



ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

ALIRAN DAYA OPTIMAL DINAMIS DENGAN PENYIMPAN ENERGI MEMPERTIMBANGKAN BATAS KEAMANAN DAN KESTABILAN TEGANGAN

Qori' Dwi Intansari S.
NRP 07111440000141

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
Vita Lystianingrum B. P., ST., M.Sc., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



TUGAS AKHIR - TE 141599

**ALIRAN DAYA OPTIMAL DINAMIS DENGAN
PENYIMPAN ENERGI MEMPERTIMBANGKAN BATAS
KEAMANAN DAN KESTABILAN TEGANGAN**

Qori' Dwi Intansari S.
NRP 07111440000141

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
Vita Lystianingrum B. P., ST., M.Sc., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

**DYNAMIC OPTIMAL POWER FLOW (DOPF) WITH
ENERGY STORAGE CONSIDERING SECURITY
CONSTRAINT AND VOLTAGE STABILITY**

Qori' Dwi Intansari S.
NRP 07111440000141

Supervisors

Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
Vita Lystianingrum B. P., ST., M.Sc., Ph.D.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

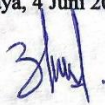
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas akhir saya dengan judul **“ALIRAN DAYA OPTIMAL DINAMIS DENGAN PENYIMPANAN ENERGI MEMPERTIMBANGKAN BATAS KEAMANAN DAN KESTABILAN TEGANGAN”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 4 Juni 2018



Qori' Dwi Intansari S.
NRP 07111440000141

**ALIRAN DAYA OPTIMAL DINAMIS DENGAN
PENYIMPAN ENERGI MEMPERTIMBANGKAN
BATAS KEAMANAN DAN KESTABILAN
TEGANGAN**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr. Eng. Rony Seto W., S.T., M.T.
NIP. 197411292000121001

Vita L. B. P., S.T., M.Sc., Ph.D.
NIP. 198208292006042001



ALIRAN DAYA OPTIMAL DINAMIS DENGAN PENYIMPAN ENERGI MEMPERTIMBANGKAN BATAS KEAMANAN DAN KESTABILAN TEGANGAN

Nama mahasiswa : Qori' Dwi Intansari S.
NRP : 07111440000141
Dosen Pembimbing I : Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
NIP : 197411292000121001
Dosen Pembimbing II : Vita Lystianingrum B. P., ST., M.Sc., Ph.D.
NIP : 198208292006042001

ABSTRAK

Beban yang berubah setiap waktu memerlukan analisis aliran daya optimal dalam rentang waktu tertentu yang kemudian disebut aliran daya optimal dinamis atau Dynamic Optimal Power Flow (DOPF). Analisis DOPF pada tugas akhir ini akan dilakukan pada sistem dengan penyimpanan energi.

Kontingensi adalah kondisi yang tidak dapat dihindarkan pada sistem tenaga listrik. Saat terjadi kontingensi, sistem harus tetap beroperasi. Kondisi kontingensi dapat menyebabkan sistem melanggar batasan-batasan operasi seperti batas saluran, ramp rate pembangkit, dan batas pembangkit. Selain kondisi kontingensi, sistem juga semakin terbebani karena peningkatan beban tidak seiring dengan pengembangan sistem sehingga sistem semakin mendekati titik kritis yang dapat menyebabkan ketidakstabilan tegangan yang ditandai dengan voltage collapse. Karena itu, analisis DOPF dengan penyimpanan energi ini dilakukan dengan mempertimbangkan batas keamanan dan kestabilan tegangan. Metode yang digunakan untuk penyelesaian tugas akhir ini adalah dengan Sequential Quadratic Programming. Dengan pertimbangan batas keamanan dan kestabilan tegangan, biaya operasi sistem dengan penyimpanan energi menjadi lebih mahal 6,8%.

Kata kunci: Aliran Daya Optimal, penyimpanan energi, batas keamanan sistem, kestabilan tegangan

Halaman ini sengaja dikosongkan

DYNAMIC OPTIMAL POWER FLOW (DOPF) WITH ENERGY STORAGE AND VOLTEGE STABILITY

Student Name : Qori' Dwi Intansari S.
NRP : 07111440000141
Supervisor I : Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
NIP : 197411292000121001
Supervisor II : Vita Lystianingrum B. P., ST., M.Sc., Ph.D.
NIP : 198208292006042001

ABSTRACT

Load that change in any time require optimal power flow analysis over a specified time range which is called Dynamic Optimal Power Flow (DOPF). DOPF analysis in this final project will be done on a system with energy storage.

Contingency is an unavoidable condition in the power system. When contingency occurs, system must remain in operation. Contingency conditions may cause the system to violate operational constraints such as transmission limit, ramp rate, and generator limit. Moreover, system is getting burdened because the load increase. So, the system getting closer to critical point that can cause voltage instability which is indicated by voltage collapse. Therefore, DOPF with energy storage will be analyzed considering to security constraint and voltage stability. Sequential Quadratic Programming is used to solve this problem. With the consideration of security constraint and voltage stability, the operating cost of the system with energy storage becomes more expensive 6.8%.

Key Word: DOPF, energy storage, security constraint, voltage stability

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala rahmat, karunia, dan petunjuk yang telah dilimpahkan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dengan judul **“ALIRAN DAYA OPTIMAL DINAMIS DENGAN PENYIMPAN ENERGI MEMPERTIMBANGKAN BATAS KEAMANAN DAN KESTABILAN TEGANGAN”**.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan tugas akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT atas limpahan rahmat, karunia dan petunjuk-Nya.
2. Ibu dan Ayah atas doa dan cinta yang tak henti pada penulis dalam keadaan apapun. Semoga Allah SWT senantiasa melindungi dan memberi mereka tempat terbaik kelak di surge-Nya.
3. Bapak Rony Seto Wibowo dan Ibu Vita Lystianingrum selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan, dan perhatiannya selama proses penyelesaian tugas akhir ini.
4. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak ilmu dan menciptakan suasana belajar yang luar biasa.
5. Agung, Amik, dan Aden yang telah banyak memberikan ilmu dan membantu penulis selama pengerjaan tugas akhir ini.
6. Mbak Dini, mbak Tifa, mbak Santi, dan mas Nurdin yang selalu sabar menjelaskan saat saya kebingungan.
7. Cici, Mila, Nisa, Tyas, dan ciwi-ciwi e54 yang selalu menemani, memberi semangat dan dukungan.
8. My twin, Intan dan Uun yang selalu memberikan dukungan dan semangat dari jauh.
9. Tim Elits Madhura, Wahyu, Jepik dan Icing yang sama-sama berjuang.
10. Teman-teman seperjuangan e54 yang telah menemani dan memberikan dukungan dari awal masa kuliah sampai penyusunan tugas akhir ini. Semoga tetap sangar dan kompak setelah lulus.

11. Teman-teman PASCAL, yang selalu mendukung dan memberi semangat.
12. Rizky, Uul, Riri, Devi, Anik, dan Putri yang selalu menghibur sejauh apapun kita.

Penulis menyadari bahwa penulisan tugas akhir ini masih banyak kekurangan, oleh karena itu, kritik dan saran sangat penulis harapkan guna menyempurnakan penulisan tugas akhir ini. Semoga tugas akhir ini dapat memberikat manfaat yang luas.

Surabaya, 4 Juni 2018

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Metodologi.....	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
1.7 Relevansi	5
BAB 2 ALIRAN DAYA OPTIMAL DINAMIS DENGAN	
PENYIMPAN ENERGI MEMPERTIMBANGKAN BATAS	
KEAMANAN DAN KESTABILAN TEGANGAN	7
2.1 Sistem Tenaga Listrik	7
2.2 Batas Keamanan Sistem Tenaga Listrik	7
2.3 Kestabilan Tegangan.....	8
2.3.1 Kriteria Kestabilan Tegangan	9
2.3.2 Voltage Collapse	10
2.4 <i>Optimal Power Flow</i> Arus Bolak Balik (AC-OPF).....	10
2.4.1 Persamaan Matematis <i>Optimal Power Flow</i> Arus Bolak Balik (AC-OPF).....	11
2.5 <i>Dynamic Optimal Power Flow</i> Arus Bolak-Balik (AC- DOPF).13	
2.5.1 Persamaan matematis <i>Dynamic Optimal Power Flow</i> Arus Bolak Balik (AC-DOPF).....	13
2.6 <i>Dynamic Optimal Power Flow</i> Arus Bolak Balik (AC- DOPF) Mempertimbangkan Batas Keamanan dan Kestabilan Tegangan	14
2.7 Penyimpan Energi.....	17

BAB 3 PENERAPAN <i>SEQUENTIAL QUADRATIC PROGRAMMING</i> PADA ALIRAN DAYA OPTIMAL DINAMIS DENGAN PENYIMPAN ENERGI	19
3.1 Algoritma	19
3.2 Sequential Quadratic Programming pada Matlab	19
3.3 Penerapan <i>Sequential Quadratic Programming</i> pada Aliran Daya Optimal Dinamis dengan Penyimpan Energi	23
BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS	33
4.1 Sistem IEEE 9 Bus	33
4.2 Pengujian Program Batas Keamanan Sistem.....	35
4.2.1 Validasi	35
4.2.2 Analisis Kontingensi	36
4.2.3 Pengujian Program <i>Ramp rate</i>	37
4.2.4 Pengujian Program Kontingensi.....	39
4.3 Pengujian Program Batas Keamanan dan Kestabilan Tegangan	41
4.4 Pengujian Program Penyimpan Energi	43
4.4.1 Pengujian Program Penyimpan Energi dalam Kondisi Normal	43
4.4.2 Pengujian Program Penyimpan Energi dengan Batas Keamanan.....	46
4.4.3 Pengujian Program Penyimpan Energi dengan Batas Keamanan dan Kestabilan Tegangan	47
4.5 Sistem IEEE 14 Bus	48
4.5.1 Analisis Kontingensi Sistem IEEE 14 Bus.....	50
4.5.2 Simulasi Program Kondisi Normal pada IEEE 14 Bus ..	51
4.5.3 Simulasi Program Batas Keamanan pada IEEE 14 Bus ..	53
4.5.4 Simulasi Program Batas Keamanan dan Kestabilan Tegangan pada IEEE 14 Bus.....	57
4.5.5 Analisis.....	58
BAB 5 KESIMPULAN	61
5.1 Kesimpulan.....	61
5.2 Saran.....	61
DAFTAR PUSTAKA.....	63
LAMPIRAN	65
BIODATA PENULIS	71

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Kurva P-V	10
Gambar 3.1	Flowchart tugas akhir	20
Gambar 4.1.	Sistem IEEE 9 bus	33
Gambar 4.2	Profil Beban sistem IEEE 9 bus.....	34
Gambar 4.3	Daya keluaran baterai A	44
Gambar 4.4	Daya keluaran baterai B	44
Gambar 4.5	SOC baterai A.....	45
Gambar 4.6	SOC baterai B	45
Gambar 4.7	Pembangkitan generator dengan baterai dan tanpa baterai	45
Gambar 4.8	Daya keluaran baterai	46
Gambar 4.9	SOC baterai	46
Gambar 4.10	Daya keluaran baterai	47
Gambar 4.11	SOC baterai	47
Gambar 4.12	Single Line Diagram IEEE 14 bus.....	48
Gambar 4.13	Profil beban sistem IEEE 14 bus	49
Gambar 4.14	Daya Keluaran Baterai 1.....	51
Gambar 4.15	SOC Baterai 1	52
Gambar 4.16	Daya Keluaran Baterai 2.....	52
Gambar 4.17	SOC Baterai 1	52
Gambar 4.18	Perbedaan pembangkitan generator kondisi normal	53
Gambar 4.19	Daya keluaran baterai 1	55
Gambar 4.20	SOC baterai 1	55
Gambar 4.21	Daya keluaran baterai 2	55
Gambar 4.22	SOC baterai 2	56
Gambar 4.23	Perbedaan pembangkitan generator kondisi normal	56
Gambar 4.24	Perbedaan pembangkitan generator kondisi kontingensi	57

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1	Data Bus Sistem Modifikasi IEEE 9 Bus	33
Tabel 4.2	Data Pembangkitan Sistem Modifikasi IEEE 9 Bus.....	34
Tabel 4.3	Data Saluran Sistem Modifikasi IEEE 9 Bus	34
Tabel 4.4	Data Level Beban untuk Validasi	35
Tabel 4.5	Perbandingan hasil AC-DOPF dan AC OPF.....	36
Tabel 4.6	Daftar dampak kontingensi sistem IEEE 9 bus	37
Tabel 4.7	Profil beban untuk validasi ramp rate	37
Tabel 4.8	Daya pembangkitan tanpa batasan ramp rate	38
Tabel 4.9	Daya pembangkitan dengan batasan ramp rate	38
Tabel 4.10	Perubahan daya pembangkitan tanpa batasan ramp rate .	38
Tabel 4.11	Perubahan daya pembangkitan dengan batasan ramp rate	38
Tabel 4.12	Perbedaan total biaya pembangkitan	38
Tabel 4.13	Level beban untuk validasi kontingensi	40
Tabel 4.14	Daya pembangkitan kondisi normal tanpa kontingensi ...	40
Tabel 4.15	Daya pembangkitan kondisi normal dengan kontingensi	40
Tabel 4.16	Daya pembangkitan kondisi kontingensi.....	40
Tabel 4.17	Perubahan daya pembangkitan normal ke kontingensi ...	40
Tabel 4.18	Total Biaya pembangkitan.....	41
Tabel 4.19	Data beban dengan Load Margin 0,2	41
Tabel 4.20	Daya pembangkitan generator kondisi normal	41
Tabel 4.21	Daya pembangkitan generator kondisi kontingensi.....	42
Tabel 4.22	Daya pembangkitan generator dengan Load Margin (λ) 0,2.....	42
Tabel 4.23	Perubahan daya pembangkitan kondisi normal-normal ..	42
Tabel 4.24	Perubahan daya pembangkitan normal ke kontingensi ...	42
Tabel 4.25	Data Baterai di IEEE 9 bus.....	44
Tabel 4.26	Data Generator Sistem Modifikasi IEEE 9 Bus	48
Tabel 4.27	Data bus sistem modifikasi IEEE 14 bus	49
Tabel 4.28	Data Baterai di IEEE 14 bus.....	49
Tabel 4.29	Daftar dampak kontingensi sistem IEEE 14 bus	50
Tabel 4.30	Level beban kondisi normal	51
Tabel 4.31	Biaya pembangkitan kondisi normal	51
Tabel 4.32	Biaya pembangkitan kondisi normal-kontingensi	53
Tabel 4.33	Perubahan daya generator kondisi normal-kontingensi tanpa baterai	54

Tabel 4.34	Perubahan daya generator kondisi normal-kontingensi dengan baterai	54
Tabel 4.35	Level beban dengan load margin 0,2	57
Tabel 4.36	Perbandingan biaya	58

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam melakukan operasi sistem, dilakukan analisis aliran daya atau power flow. Analisis aliran daya digunakan untuk mencari aliran daya optimal pada sistem sehingga sistem dapat beroperasi dengan biaya minimal sesuai dengan kebutuhan beban. Untuk memenuhi kebutuhan beban yang selalu berubah setiap waktu, diperlukan analisis aliran daya optimal dinamis atau Dynamic Optimal Power Flow (DOPF) [1]. Dengan analisis DOPF, penjadwalan pembangkit pada setiap rentang waktu dapat dengan mudah dilakukan.

Tiga kriteria yang harus dimiliki oleh sistem tenaga listrik adalah economy, quality, dan security [2]. Economy adalah kriteria biaya operasi sistem. Pengoptimalan biaya operasi sangat diperlukan agar dalam memenuhi kebutuhan beban dapat terjadi kesetimbangan antara biaya pembangkitan dan beban. Biaya pembangkitan yang merupakan biaya bahan bakar adalah biaya terbesar dalam sistem operasi tenaga listrik sehingga perlu dilakukan pengoptimalan sistem agar sistem beroperasi secara ekonomis. Quality atau kualitas sistem tenaga listrik dapat dilihat dari kualitas tegangan dan frekuensi yang sesuai standar dan memenuhi kebutuhan beban. Security atau keamanan sistem merupakan kriteria mengenai keamanan sistem terhadap kemungkinan terjadinya gangguan. Ketiga kriteria ini harus terpenuhi saat sistem beroperasi normal maupun saat terjadi kontingensi. Kontingensi adalah kejadian yang disebabkan oleh kegagalan operasi dari satu atau lebih pembangkit atau saluran transmisi [3]. Kontingensi ini dapat menyebabkan terjadinya pelanggaran pada batas keamanan sistem, seperti ramp rate generator dan karakteristik saluran. Selain itu sistem yang semakin terbebani membuat sistem semakin mendekati titik kritis yang dapat menyebabkan ketidakstabilan tegangan pada sistem yang ditandai dengan terjadinya voltage collapse [4]. Untuk menghindari pelanggaran pada batas keamanan dan ketidakstabilan tegangan pada sistem, perlu dilakukan analisis aliran daya optimal dengan mempertimbangkan batas keamanan dan kestabilan sistem. Pada Tugas Akhir ini, analisis aliran daya optimal dinamis akan dilakukan pada sistem dengan penyimpanan energi yang terdistribusi pada sistem.

1.2 Permasalahan

Berdasarkan uraian latar belakang, hal yang menjadi permasalahan dan akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah mencari pembebanan pembangkit yang optimal untuk memenuhi kebutuhan beban dan pengaruh penyimpanan energi yang terdistribusi pada sistem. Analisis ini akan mempertimbangkan batas keamanan dan kestabilan tegangan sistem. Batas keamanan sistem ini berupa *ramp rate* pembangkit, kapasitas saluran, dan kontingensi yang terjadi pada sistem. Pertimbangan kestabilan tegangan pada sistem dilakukan untuk mencegah terjadinya *voltage collapse* saat terjadi kenaikan beban.

1.3 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam tugas akhir ini adalah untuk mengetahui pembebanan pembangkit yang optimal untuk memenuhi kebutuhan beban dan pengaruh penyimpanan energi yang terdistribusi pada sistem mempertimbangkan batas keamanan dan kestabilan tegangan sistem sehingga tidak melanggar batas keamanan sistem yang berupa *ramp rate* pembangkit, kapasitas saluran, dan kontingensi yang terjadi pada sistem serta mencegah terjadinya *voltage collapse*.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. *Ramp up* dan *ramp down* pembangkit dianggap sama.
2. Semua pembangkit diasumsikan selalu beroperasi.
3. Semua saluran diasumsikan *double circuit*.
4. Analisis kestabilan tegangan menggunakan pendekatan *Load Margin* sebesar 0,2
5. Penyimpan energi yang digunakan pada Tugas Akhir ini adalah baterai
6. Rugi umur penyimpan energi diabaikan.
7. Biaya *maintenance* dan investasi penyimpan energi diabaikan.
8. Tidak dilakukan optimalisasi pada peletakan dan *sizing* dari penyimpanan energi.
9. Efisiensi masing-masing pembangkit dan penyimpan energi dianggap 100%.
10. Simulasi dilakukan dengan Matpower 3.2 pada Matlab R2014a.

1.5 Metodologi

Metodologi yang akan digunakan dalam menyusun penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Pustaka

Studi pustaka yang dilakukan yaitu mengenai AC power flow, DOPF, karakteristik penyimpanan energi, karakteristik saluran, *ramp rate* pembangkit, SCOPF, Voltage Stability Constraint (VSC), dan penggunaan Quadratic Programming pada Matpower Matlab untuk perhitungan DOPF.

2. Pengumpulan Data

Pada tahap ini akan dilakukan pengumpulan data untuk sistem yang akan digunakan, yaitu sistem IEEE 9 bus dan 14 bus. Data-data ini berupa data generator, data saluran, dan data beban. Data generator terdiri dari data cost function, kemampuan pembangkitan maksimum dan minimum generator, dan *ramp rate* untuk masing-masing generator. Data saluran terdiri dari data impedansi saluran dan kapasitas saluran.

3. Pembuatan M-file

Penerapan DOPF dengan penyimpanan energi menggunakan Quadratic Programming pada Matpower Matlab dengan pertimbangan batas keamanan dan kestabilan tegangan sistem.

4. Simulasi dan Analisis

Simulasi akan dilakukan dengan empat kondisi yang berbeda. Kondisi pertama dilakukan analisis DOPF pada sistem yang ditentukan. Kondisi kedua adalah analisis DOPF dengan penyimpanan energi yang terdistribusi pada sistem. Kondisi ketiga akan mempertimbangkan batas keamanan sistem. Kondisi terakhir akan mempertimbangkan batas keamanan dan kestabilan tegangan sistem. Keempat kondisi ini akan divalidasi menggunakan sistem IEEE 9 bus yang kemudian akan digunakan untuk menganalisis sistem IEEE 14 bus.

5. Pembuatan Laporan

Dari hasil analisis data yang telah dilakukan akan diambil kesimpulan tentang DOPF pada sistem IEEE 14 bus dengan membandingkan kasus yang dilakukan dan dilaporkan dalam bentuk laporan tugas akhir.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam tugas akhir ini terdiri atas lima bab dengan uraian sebagai berikut :

Bab 1 : PENDAHULUAN

Bab ini membahas tentang latar belakang, permasalahan dan batasan masalah, tujuan, metode penelitian, sistematika penulisan, dan relevansi dari Tugas Akhir.

Bab 2 : ALIRAN DAYA OPTIMAL DINAMIS DENGAN PENYIMPAN ENERGI MEMPERTIMBANGKAN BATAS KEMANAN DAN KESTABILAN TEGANGAN

Bab ini membahas tentang dasar teori yang dipakai dalam penyusunan Tugas Akhir ini. Dasar teori ini berupa penjelasan tentang OPF, DOPF, penyimpanan energi, batas keamanan, dan kestabilan tegangan.

Bab 3 : *SEQUENTIAL QUADRATIC PROGRAMMING* DALAM ALIRAN DAYA OPTIMAL DINAMIS DENGAN PENYIMPAN ENERGI MEMPERTIMBANGKAN BATAS KEMANAN DAN KESTABILAN TEGANGAN

Bab ini membahas tentang penerapan *sequential quadratic programming* untuk penerapan aliran daya optimal dinamis dengan penyimpanan energi mempertimbangkan batas keamanan dan kestabilan tegangan sistem.

Bab 4 : SIMULASI DAN ANALISIS

Bab ini membahas hasil dan analisis simulasi aliran daya optimal dinamis dengan penyimpanan energi mempertimbangkan batas keamanan dan kestabilan tegangan sistem.

Bab 5 : PENUTUP

Bab ini berisi tentang kesimpulan dari permasalahan dan saran dari hasil pembahasan yang telah dilakukan.

1.7 Relevansi

Tugas akhir diharapkan dapat memberikan manfaat, yaitu:

1. Dapat memberikan manfaat terhadap perkembangan sistem tenaga khususnya untuk permasalahan aliran daya optimal dinamis dengan penyimpan energi yang terdistribusi pada sistem.
2. Dapat menjadi referensi untuk tugas akhir selanjutnya dengan topik serupa.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

ALIRAN DAYA OPTIMAL DINAMIS DENGAN PENYIMPAN ENERGI MEMPERTIMBANGKAN BATAS KEAMANAN DAN KESTABILAN TEGANGAN

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Energi listrik adalah bentuk energi yang paling populer karena dapat dialirkan secara mudah dengan efisiensi yang tinggi dan harga yang wajar [1]. Energi listrik dikirim melalui sistem tenaga listrik yang dibagi menjadi empat bagian utama yaitu pembangkitan, transmisi, distribusi, dan beban. Pada bagian pembangkitan terjadi proses pembangkitan energi listrik dengan bantuan generator atau photovoltaic (PV). Energi listrik yang terbangkit selanjutnya disalurkan melalui jaringan transmisi ke pusat distribusi. Kemudian dari pusat distribusi disalurkan ke jaringan distribusi hingga sampai pada beban.

Tiga kriteria yang harus dimiliki oleh sistem tenaga listrik adalah economy, quality, dan security [2]. Economy adalah kriteria biaya operasi sistem. Pengoptimalan biaya operasi sangat diperlukan agar dalam memenuhi kebutuhan beban dapat terjadi kesetimbangan antara biaya pembangkitan dan beban. Biaya pembangkitan yang merupakan biaya bahan bakar adalah biaya terbesar dalam sistem operasi tenaga listrik sehingga perlu dilakukan pengoptimalan sistem agar sistem beroperasi secara ekonomis. Quality atau kualitas sistem tenaga listrik dapat dilihat dari kualitas tegangan dan frekuensi yang sesuai standar dan memenuhi kebutuhan beban. Security atau keamanan sistem merupakan kriteria mengenai keamanan sistem terhadap kemungkinan terjadinya gangguan. Ketiga kriteria ini harus terpenuhi saat sistem beroperasi normal maupun saat terjadi kontingensi.

2.2 Batas Keamanan Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik tidak selalu beroperasi pada keadaan normal, akan selalu ada kemungkinan sistem mengalami kontingensi. Kontingensi adalah kejadian yang disebabkan oleh kegagalan operasi dari satu atau lebih pembangkit atau saluran transmisi [3]. Kontingensi ini dapat menyebabkan terjadinya pelanggaran pada batas keamanan sistem, seperti kemampuan pembangkit dan karakteristik saluran. Padahal salah

satu dari tiga kriteria yang harus dimiliki sistem tenaga listrik adalah *security* atau keamanan. Karena itulah dikembangkan batas keamanan sistem aliran daya optimal atau *Security Constraint Optimal Power Flow* (SCOPF) [4].

SCOPF adalah pengembangan dari aliran daya optimal standar dengan menambahkan pertimbangan pada keadaan kontingensi pada perumusannya. Batas keamanan seperti karakteristik saluran dan batas tegangan dapat dihindari pada keadaan normal maupun keadaan kontingensi dengan pertimbangan ini [4]. Tindakan pengamanan yang dapat dilakukan pada sistem salah satunya dengan menjaga agar saluran transmisi tidak ada yang mengalami pembebanan lebih saat terjadi kontingensi. Pembebanan berlebih ini akan mengakibatkan drop tegangan pada elemen yang bersangkutan bertambah. Akibatnya tegangan pada beberapa bus pada sistem tersebut ikut menurun dan dapat merusak peralatan listrik pada sistem. Untuk menjaga keamanan sistem dapat dilakukan dengan beberapa cara, salah satunya adalah melakukan *re-dispatch* pembangkit sehingga dapat memenuhi batasan operasi [4] terutama untuk saluran transmisi sehingga tidak terjadi overload dan drop tegangan yang berlebih. Untuk mengevaluasi keamanan sistem, dilakukan analisis kontingensi [4]. Analisis ini dilakukan dengan simulasi gangguan pada suatu saluran transmisi.

2.3 Kestabilan Tegangan

Kestabilan pada sistem tenaga didefinisikan sebagai kemampuan sebuah sistem untuk mempertahankan operasi yang setimbang saat beroperasi normal dan kembali ke kondisi normal setelah terjadi gangguan [5]. Sistem tenaga listrik memiliki beban yang bervariasi setiap waktu, karena perubahan tersebut kestabilan sistem harus selalu diperhatikan dan dijaga agar operasi sistem berjalan dengan baik. Berdasarkan sifat dan besarnya gangguan analisis kestabilan digolongkan menjadi tiga, yaitu kestabilan transien, kestabilan dinamis, dan kestabilan *steady state* [5]. Kestabilan transien adalah kemampuan sistem untuk mencapai titik keseimbangan atau sinkronisasi setelah mengalami gangguan yang besar menyebabkan sistem kehilangan kestabilan karena gangguan yang terjadi diatas kemampuan sistem. Kestabilan dinamis merupakan kemampuan sistem untuk kembali ke titik seimbang setelah terjadi gangguan yang berasal dari peralatan control sistem. Sedangkan kestabilan *steady state* adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk

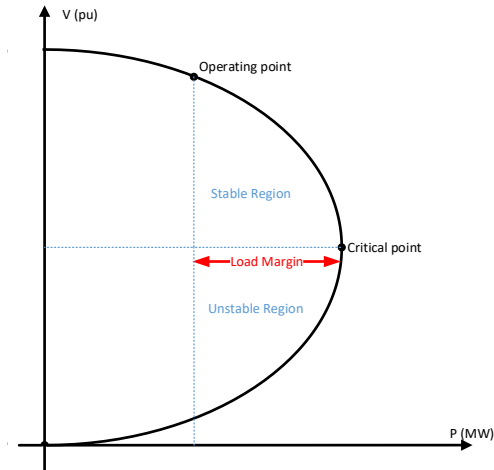
menerima gangguan kecil yang bersifat gradual yang terjadi disekitar titik seimbang pada kondisi *steady state* selain terjadinya gangguan pada sistem, ketidakstabilan dapat terjadi saat beban pada saluran transmisi terlalu tinggi, sumber tegangan jauh dari pusat beban, sumber tegangan terlalu rendah, dan tidak cukupnya kapasitas dari *load reactive compensation*.

Kestabilan tegangan adalah kemampuan sistem untuk mempertahankan tegangan yang dapat diterima pada semua bus saat operasi normal dan setelah kontingensi [5]. Kestabilan tegangan dalam tugas akhir ini dianalisis dalam keadaan *steady state* karena mampu memberikan informasi tentang tingkat kestabilan tegangan sistem, jarak kondisi sistem dengan batas wilayah ketidakstabilan tegangan dan menginformasikan bus atau saluran yang menjadi penyebab sistem memasuki wilayah ketidakstabilan tegangan. Ketidakstabilan tegangan dapat terjadi karena adanya gangguan, kenaikan beban, atau perubahan sistem yang membuat *voltage collapse*. Penyebab utama ketidakstabilan ini adalah ketidakmampuan sistem untuk memenuhi permintaan daya reaktif beban. Kestabilan tegangan kini memperoleh perhatian lebih karena pesatnya perkembangan beban membuat sistem semakin terbebani [6].

2.3.1 Kriteria Kestabilan Tegangan

Kurva P-V adalah kurva yang menggambarkan karakteristik tegangan pada perubahan daya aktif akibat perubahan beban. Kurva ini dihasilkan dari simulasi aliran daya pada tingkat beban yang berbeda-beda yang berupa nilai magnitudo tegangan dan daya aktif bus tertentu. Titik kritis pada kenaikan beban sangat penting untuk diketahui karena dapat menjadi indikator akan terjadinya *voltage collapse*. Wilayah atas titik kritis merupakan wilayah operasi yang stabil. Sedangkan wilayah bawah titik kritis merupakan wilayah operasi yang tidak stabil.

Perpotongan antara kurva P-V yang menunjukkan karakteristik transmisi dan kurva karakteristik beban merupakan titik operasi sistem tenaga listrik. Ketidak stabilan dapat terjadi apabila tidak ada titik potong antara kurva P-V dengan kurva karakteristik beban akibat beban menyerap daya yang lebih besar daripada kemampuan transmisi. Pada kondisi ini kurva karakteristik beban berada diluar kurva P-V sistem.



Gambar 2.1 Kurva P-V

2.3.2 Voltage Collapse

Voltage collapse atau tegangan jatuh dapat terjadi karena adanya kenaikan beban yang sangat besar pada sistem. Kenaikan beban yang sangat besar ini menyebabkan tegangan yang beroperasi berada dibawah level tegangan saat beroperasi normal sehingga mengakibatkan ketidakstabilan tegangan yang jika tidak segera diatasi akan mengakibatkan dampak yang besar yaitu pemadaman secara merata (*blackout*). Peningkatan beban secara terus-menerus juga dapat menyebabkan *voltage collapse*. Ukuran fundamental untuk jarak sistem terhadap *voltage collapse* disebut *load margin* (λ). *Load margin* dirumuskan dengan persamaan 2.1.

$$P_c = (1 + \lambda) \times P_o \quad (2.1)$$

keterangan

P_c : Beban saat kondisi awal
 P_o : Beban saat kondisi kedua
 λ : *load margin*

2.4 Optimal Power Flow Arus Bolak Balik (AC-OPF)

Power Flow atau aliran daya adalah studi yang mempelajari tentang aliran beban yang dinyatakan dengan megawatt (MW) dan

megavar (MVAR) yang disuplai ke suatu titik beban dari satu atau lebih pembangkit melalui saluran transmisi [7]. Karena dalam analisis aliran daya tidak memperhitungkan batasan daya aktif dan reaktif dari pembangkit, studi ini digabungkan dengan permasalahan *Economic Dispatch* (ED). Dalam ED dipelajari analisis biaya pembangkitan generator yang paling murah pada kondisi beban tertentu. Analisis ED memperhitungkan biaya pembangkitan dan batasan pada generator. Dengan menggabungkan analisis ED dan aliran daya, akan ditemukan titik optimal pada sistem dimana aliran daya akan sesuai dengan beban pada biaya pembangkitan yang murah. Gabungan analisis ini kemudian disebut *Optimal Power Flow* (OPF) atau aliran daya optimal. Analisis OPF ini memiliki variable-variabel pembatas seperti daya aktif dan reaktif generator, tegangan, dan sudut tegangan. OPF arus bolak-balik (AC-OPF) menggunakan perhitungan *AC Power Flow*. AC-OPF memiliki perhitungan yang lebih rumit daripada DC-OPF tetapi akan lebih sesuai dengan kondisi sistem saat ini yang banyak menggunakan sistem AC.

2.4.1 Persamaan Matematis *Optimal Power Flow* Arus Bolak Balik (AC-OPF)

Fungsi objektif dari permasalahan OPF adalah fungsi biaya pembangkitan yang dirumuskan dengan persamaan 2.2.

$$F_i(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (2.2)$$

atau dapat disederhanakan menjadi,

$$C = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N F_i(P_{it}) \quad (2.3)$$

keterangan

- F_i : Biaya pembangkitan pada pembangkit ke-i (Rp)
- P_i : Daya keluaran generator ke-I (MW)
- a_i, b_i, c_i : Koefisien biaya pembangkit ke-i
- C : Biaya operasi
- N : Jumlah generator pada sistem

Solusi permasalahan OPF memiliki dua batasan umum yaitu *equality* dan *inequality constraint*. *Equality constraint* adalah batasan persamaan yang harus diikuti. *Equality constraint* dalam permasalahan

OPF adalah persamaan keseimbangan daya aktif dan reaktif pada tiap bus sistem yang harus dicukupi. Sedangkan *Inequality constraint* merupakan batasan pertidaksamaan yang biasanya digunakan untuk batas keamanan sistem. *Inequality constraint* dalam permasalahan *OPF* adalah batasan pembangkitan daya generator, aliran daya di kapasitas saluran dan *ramp rate* generator.

Equality constraint dalam OPF mempunyai persamaan sebagai berikut:

$$P_i - Q_i = (P_{gi} - P_{di}) + j(Q_{gi} - Q_{di}) = V_i^* \left(\sum_{j=1}^n V_j Y_{ij} \right)$$

$$Y_{ij} = G_{ij} + B_{ij}$$

sehingga

$$P_i = P_{gi} - P_{di} = \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (2.4)$$

$$Q_i = Q_{gi} - Q_{di} = \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (2.5)$$

Keterangan:

- i : jumlah bus, $i = 1, 2, 3, \dots, n$
- P_i dan Q_i : injeksi daya aktif dan reaktif di bus i
- P_{gi} dan Q_{gi} : daya aktif dan reaktif generator di bus i
- P_{di} dan Q_{di} : daya aktif dan reaktif beban di bus i
- Y : admitansi saluran
- G : konduktansi saluran
- B : suseptansi saluran

Sedangkan persamaan untuk *inequality constraint* dalam permasalahan OPF adalah sebagai berikut:

1. Batasan pembangkit

$$P_{gi}^{min} \leq P_{gi} \leq P_{gi}^{max} \quad i = 1, 2, \dots, ng \quad (2.6)$$

$$Q_{gi}^{min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi}^{max} \quad i = 1, 2, \dots, ng \quad (2.7)$$

2. Batasan tegangan :

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \quad i = 1, 2, \dots, nb \quad (2.8)$$

$$\theta_i^{min} \leq \theta_i \leq \theta_i^{max} \quad i = 1, 2, \dots, nb \quad (2.9)$$

3. Batasan saluran transmisi :

$$S_l \leq S_l^{max} \quad l = 1, 2, \dots, \text{nbr} \quad (2.10)$$

Keterangan :

V_i : Magnitud tegangan di bus-i
 θ_i : Sududt tegangan di bus-i
 S_l : *power flow* di bus i

2.5 *Dynamic Optimal Power Flow Arus Bolak-Balik (AC-DOPF)*

Dalam OPF konvensional beban dianggap sama setiap waktu sedangkan pada kondisi sebenarnya beban selalu berubah. Karena itu OPF kemudian dikembangkan menjadi *Dynamic Optimal Power Flow (DOPF)*. Dengan DOPF analisis aliran daya optimal akan menyesuaikan beban yang dinamis. Beban dinamis adalah beban yang bervariasi atau fluktuatif dalam selang waktu tertentu selama waktu tertentu [3]. Dalam Tugas Akhir ini selang waktu perubahan beban adalah satu jam.

Beban yang dinamis menyebabkan pengaturan pembangkit berubah sesuai dengan selang waktu perubahan beban untuk dapat memenuhi kebutuhan beban tersebut. Pengaturan pembangkit ini harus sesuai dengan kemampuan generator. Kemampuan generator ini berupa *ramp rate* yang berhubungan dengan *life time* pembangkit dan peralatan pendukung pembangkit tersebut [7]. *Ramp rate* akan menjadi batasan tambahan pada analisis DOPF yang tidak ada pada analisis OPF. *Ramp rate* generator menunjukkan keterkaitan antara level pembangkitan sebelumnya dan waktu sesudahnya dalam waktu tertentu.

2.5.1 *Persamaan matematis Dynamic Optimal Power Flow Arus Bolak Balik (AC-DOPF)*

Pada persamaan matematis DOPF akan ditambahkan Batasan *ramp rate* generator untuk memenuhi setiap level beban pada waktu tertentu. Fungsi biaya pembangkitan dimodelkan dengan persamaan berikut:

$$F_i^t(P_{gi}^t) = a_i(P_{gi}^t)^2 + b_i P_{gi}^t + c_i \quad (2.11)$$

Fungsi objektif pada permasalahan DOPF adalah

$$\min \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^N F_i^t(P_{gi}^t) \right) \quad (2.12)$$

Fungsi pada persamaan 2.12 akan meminimalkan biaya pembangkitan dari semua pembangkit dalam selang waktu T. fungsi ini diminimalkan melalui :

1. Batasan keseimbangan daya aktif dan reaktif pada setiap bus

$$P_i^t = P_{gi}^t - P_{di}^t = \sum_{j=1}^n V_i^t V_j^t (G_{ij} \cos \theta_{ij}^t + B_{ij} \sin \theta_{ij}^t) \quad (2.13)$$

$$Q_i^t = Q_{gi}^t - Q_{di}^t = \sum_{j=1}^n V_i^t V_j^t (G_{ij} \sin \theta_{ij}^t - B_{ij} \cos \theta_{ij}^t) \quad (2.14)$$

2. Batasan pembangkitan daya untuk generator

$$P_{gi}^{min} \leq P_{gi}^t \leq P_{gi}^{max} \quad (2.15)$$

$$Q_{gi}^{min} \leq Q_{gi}^t \leq Q_{gi}^{max} \quad (2.16)$$

3. Batasan tegangan

$$V_i^{min} \leq V_i^t \leq V_i^{max} \quad (2.17)$$

$$\theta_i^{min} \leq \theta_i^t \leq \theta_i^{max} \quad (2.18)$$

4. Batasan aliran daya saluran

$$S_i^t \leq S_i^{max} \quad (2.19)$$

5. Batasan ramp rate

$$-\delta_i \leq P_{gi}^{t+1} - P_{gi}^t \leq \delta_i \quad (2.20)$$

δ_i merupakan ramp rate generator ke-i. Ramp up dan ramp down semua generator adalah sama dan bernilai sama.

2.6 *Dynamic Optimal Power Flow Arus Bolak Balik (AC-DOPF)* **Mempertimbangkan Batas Keamanan dan Kestabilan Tegangan**

Dynamic Optimal Power Flow (DOPF) dapat digunakan untuk perencanaan dengan multilevel beban sesuai dengan kondisi realtime, dengan *ramp rate* sebagai kopling yang mengatur perubahan dispatch dalam mengatasi perubahan beban yang terjadi [3]. Dalam kondisi sebenarnya sistem tidak lepas dengan kemungkinan terjadinya kontingensi. Kontingensi dapat terjadi pada rentang waktu tertentu pada saat sistem beroperasi. Keadaan kontingensi akan mempengaruhi perubahan operasi pada sistem yang dapat menyebabkan sistem melanggar batasan-batasan yang ada. Karena itu keadaan kontingensi ini

akan menjadi tambahan pada batas keamanan sistem. Selanjutnya, pembebanan yang semakin meningkat pada sistem menyebabkan system semakin terbebani. System yang semakin terbebani akan menyebabkan tegangan system turun. Analisis tegangan ini dilakukan dengan analisis kestabilan tegangan. Pada tugas akhir ini menggunakan analisis kestabilan tegangan dilakukan dengan pendekatan load margin 0,2.

Batasan-batasan sistem pada kondisi normal

1. Batasan keseimbangan daya aktif dan reaktif pada setiap bus

$$P_i^t = P_{gi}^t - P_{di}^t = \sum_{j=1}^n V_i^t V_j^t (G_{ij} \cos \theta_{ij}^t + B_{ij} \sin \theta_{ij}^t) \quad (2.21)$$

$$Q_i^t = Q_{gi}^t - Q_{di}^t = \sum_{j=1}^n V_i^t V_j^t (G_{ij} \sin \theta_{ij}^t - B_{ij} \cos \theta_{ij}^t) \quad (2.22)$$

2. Batasan pembangkitan daya untuk generator

$$P_{gi}^{min} \leq P_{gi}^t \leq P_{gi}^{max} \quad (2.23)$$

$$Q_{gi}^{min} \leq Q_{gi}^t \leq Q_{gi}^{max} \quad (2.24)$$

3. Batasan tegangan

$$V_i^{min} \leq V_i^t \leq V_i^{max} \quad (2.25)$$

$$\theta_i^{min} \leq \theta_i^t \leq \theta_i^{max} \quad (2.26)$$

4. Batasan aliran daya saluran

$$S_i^t \leq S_i^{max} \quad (2.27)$$

5. Batasan *ramp rate*

$$-\delta_i \leq P_{gi}^{t+1} - P_{gi}^t \leq \delta_i \quad (2.28)$$

Batasan-batasan sistem saat kontingensi,

1. Batasan keseimbangan daya aktif dan reaktif pada setiap bus

$$P_i^{kt} = P_{gi}^{kt} - P_{di}^{kt} = \sum_{j=1}^n V_i^{kt} V_j^{kt} (G_{ij} \cos \theta_{ij}^{kt} + B_{ij} \sin \theta_{ij}^{kt}) \quad (2.29)$$

$$Q_i^{kt} = Q_{gi}^{kt} - Q_{di}^{kt} = \sum_{j=1}^n V_i^{kt} V_j^{kt} (G_{ij} \sin \theta_{ij}^{kt} - B_{ij} \cos \theta_{ij}^{kt}) \quad (2.30)$$

2. Batasan pembangkitan daya untuk generator

$$P_{gi}^{min} \leq P_{gi}^{kt} \leq P_{gi}^{max} \quad (2.31)$$

$$Q_{gi}^{min} \leq Q_{gi}^{kt} \leq Q_{gi}^{max} \quad (2.32)$$

3. Batasan tegangan

$$V_i^{min} \leq V_i^{kt} \leq V_i^{max} \quad (2.33)$$

$$\theta_i^{min} \leq \theta_i^{kt} \leq \theta_i^{max} \quad (2.34)$$

4. Batasan aliran daya saluran

$$S_i^{kt} \leq S_i^{max} \quad (2.35)$$

5. Batasan *ramp rate*

$$-\frac{\delta_i}{5} \leq P_{gi}^{kt+1} - P_{gi}^{kt} \leq \frac{\delta_i}{5} \quad (2.36)$$

Batasan-batasan sistem saat load margin 0,2,

1. Batasan keseimbangan daya aktif dan reaktif pada setiap bus

$$P_i^{ct} = P_{gi}^{ct} - P_{di}^{ct} = \sum_{j=1}^n V_i^{ct} V_j^{ct} (G_{ij} \cos \theta_{ij}^{ct} + B_{ij} \sin \theta_{ij}^{ct}) \quad (2.37)$$

$$Q_i^{ct} = Q_{gi}^{ct} - Q_{di}^{ct} = \sum_{j=1}^n V_i^{ct} V_j^{ct} (G_{ij} \sin \theta_{ij}^{ct} - B_{ij} \cos \theta_{ij}^{ct}) \quad (2.38)$$

2. Batasan pembangkitan daya untuk generator

$$P_{gi}^{min} \leq P_{gi}^{ct} \leq P_{gi}^{max} \quad (2.39)$$

$$Q_{gi}^{min} \leq Q_{gi}^{ct} \leq Q_{gi}^{max} \quad (2.40)$$

3. Batasan tegangan

$$V_i^{min} \leq V_i^{ct} \leq V_i^{max} \quad (2.41)$$

$$\theta_i^{min} \leq \theta_i^{ct} \leq \theta_i^{max} \quad (2.42)$$

4. Batasan aliran daya saluran

$$S_i^{ct} \leq S_i^{max} \quad (2.43)$$

5. Batasan *ramp rate*

$$-\frac{\delta_i}{5} \leq P_{gi}^{ct+1} - P_{gi}^{ct} \leq \frac{\delta_i}{5} \quad (2.44)$$

2.7 Penyimpan Energi

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \quad (2.45)$$

$$E_{PE\ min} \leq E_0 - \sum_{t=1}^T E_{PE}(t) \leq E_{PE\ max} \quad (2.46)$$

$$E_{PE}(t) = P_{PE}(t) \times h \quad (2.47)$$

dimana,

SOC_{min} : Batas bawah baterai dalam satuan energi

SOC_{max} : Batas atas baterai dalam satuan energi

E_0 : Energi mulai pada baterai

E_{PE} : Energi keluaran baterai saat t

P_{PE} : Daya keluaran baterai

t : Waktu operasi

Penyimpan energi atau *energy storage* adalah alat yang digunakan untuk menyimpan energi sehingga dapat digunakan pada saat yang berbeda. Pada sistem tenaga listrik penyimpan energi yang banyak dipakai adalah baterai. Baterai sudah banyak digunakan dalam berbagai aplikasi dalam sistem tenaga [9] seperti memenuhi kebutuhan energi saat terjadi perubahan beban sehingga tidak perlu dilakukan *redispatch* pembangkit, memotong puncak beban yang ditanggung oleh pembangkit, serta sebagai penyedia fleksibilitas yang dibutuhkan oleh sumber pembangkit dengan energi terbarukan yang *intermittent* [10]. Pada [11] penyimpan energi dapat digunakan sebagai *corrective control* untuk membantu sistem dalam mengatasi kontingensi yang terjadi. Dengan adanya openyimpan energi pada sistem, biaya pembangkitan selama 24 jam dapat dikurangi. Penyimpan energi dapat melakukan *charging* dan *discharging* dengan cepat. Tetapi setiap penyimpan energi memiliki Batasan yang harus dipenuhi selama pengoperasiannya yang kemudian disebut dengan *state of charge* (SOC). SOC ini dirumuskan dengan persamaan 2.45, 2.46, dan 2.47.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

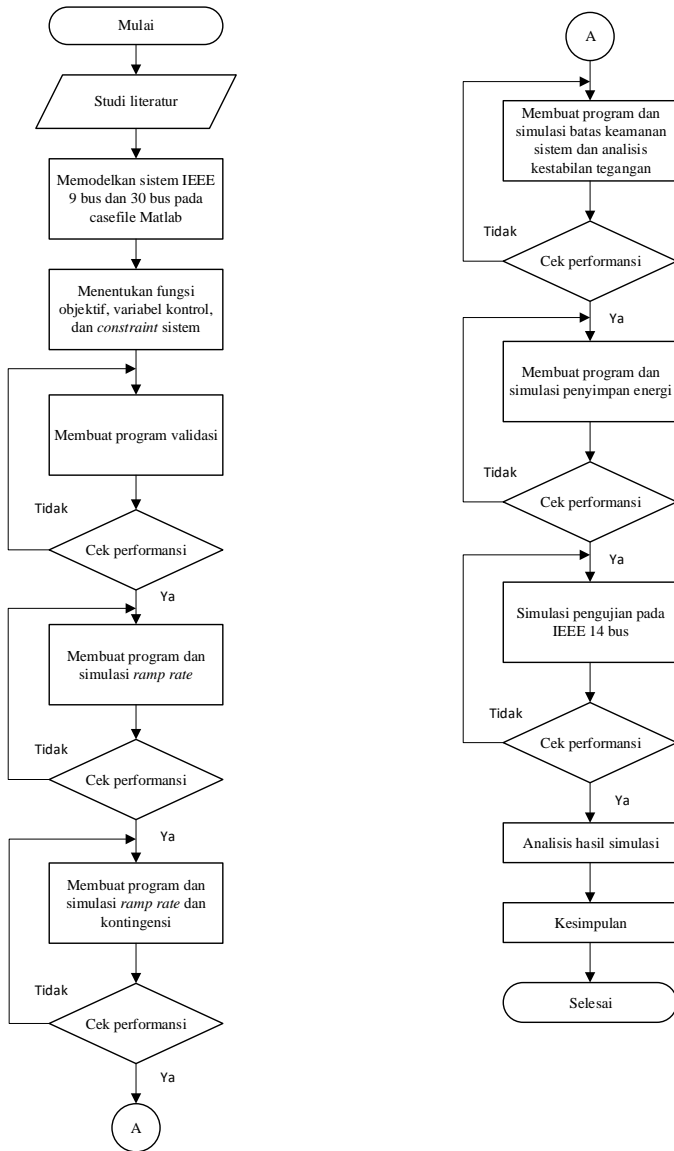
PENERAPAN *SEQUENTIAL QUADRATIC PROGRAMMING* PADA ALIRAN DAYA OPTIMAL DINAMIS DENGAN PENYIMPAN ENERGI

3.1 Algoritma

Pada Tugas Akhir ini akan menggunakan *sequential quadratic programming* untuk menyelesaikan permasalahan aliran daya optimal dinamis dengan penyimpanan energi mempertimbangkan batas keamanan dan kestabilan tegangan. Pengerjaan Tugas Akhir dimulai dengan pengumpulan daya saluran, data beban, serta data pembangkit pada sistem IEEE 9 bus dan 14 bus yang telah dimodifikasi. Selanjutnya pemodelan sistem dilakukan menggunakan M-file Matlab. Kemudian menentukan fungsi objektif, variable yang akan dioptimasi, dan batasan permasalahan pada kasus DOPF ini. DOPF pada tugas akhir ini akan mempertimbangkan batas keamanan sistem dan kestabilan tegangan pada sistem yang memiliki penyimpanan energi, maka perhitungan dilakukan dalam beberapa kondisi yaitu kondisi normal, kondisi normal dan kontingensi untuk analisis batas keamanan sistem, serta kondisi *Load Margin* 0,2 untuk analisis kestabilan tegangan. Semua kondisi ini akan divalidasi dengan sistem IEEE 9 bus. Sistem secara bertahap divalidasi dengan pembuatan program batas keamanan sistem terlebih dahulu kemudian ditambahkan dengan program untuk analisis kestabilan tegangan. Pada pembuatan program batas keamanan sistem, validasi dilakukan sebanyak empat tahap yaitu tahap validasi *Sequential Quadratic Programming* dengan AC-OPF Matpower secara individual, validasi *ramp rate*, dan kondisi kontingensi. Kemudian program yang telah dibuat ditambahkan dengan program untuk analisis Kestabilan Tegangan dengan *Load Margin* (λ) 0,2. Setelah validasi dengan sistem IEEE 9 bus dilakukan simulasi dan analisis dengan sistem IEEE 14 bus. Flowchart untuk Tugas Akhir ini dapat dilihat pada gambar 3.1.

3.2 Sequential Quadratic Programming pada Matlab

Sequential quadratic programming adalah salah satu metode optimasi nonlinear yang paling unggul daripada metode optimasi nonlinier lainnya dalam hal efisiensi, akurasi, dan prosentase solusi sukses selama sejumlah pengujian permasalahan.



Gambar 3.1 Flowchart tugas akhir

Metode SQP bekerja dengan mengkonversi persoalan nonlinier menjadi bentuk persoalan pemrograman kuadratik. Metode ini menghasilkan subproblem dari quadratic programming pada tiap iterasi, dan solusi dari subproblem ini dapat digunakan untuk menentukan nilai taksiran dari solusi di iterasi berikutnya.

Matpower adalah M-file yang telah dikembangkan untuk menyelesaikan permasalahan optimasi pada sistem tenaga. Pada matpower terdapat fungsi *fmincon* yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan optimasi nonlinier dengan metode *sequential quadratic programming*.

Berikut adalah argument input pada fungsi *fmincon* :

1. Fun : fungsi yang diminimalkan dan merupakan fungsi yang menampung vector x dan mengembalikan scalar f, fungsi tujuan dievaluasi pada vector x. fun adalah fungsi handle dari sebuah file
2. x0 : vector yang menyatakan initial point dari vector x
3. Aeq : matriks yang menyatakan koefisien linier dari *equality constraint*
4. beq : vector yang menyatakan vector konstan dari *equality constraint* dimana $Aeq \cdot x = beq$
5. Aineq : matriks yang menyatakan koefisien nonlinier dari *inequality constraint*
6. bineq : vector yang menyatakan vector konstan dari *inequality constraint*, dimana $Aineq \cdot x \leq bineq$
7. Lb : vector yang menyatakan batas nilai bawah dari persamaan $lb \leq x \leq ub$
8. Ub : vector yang menyatakan batas nilai atas dari persamaan $lb \leq x \leq ub$

Perintah-perintah yang digunakan untuk melakukan pemanggilan program dengan argument input dalam *fmincon_matpower* adalah sebagai berikut :

1. $x = \text{fmincon}(\text{fun}, x0, A, b)$

Meminimalkan fungsi x dimulai dengan nilai awal x0 yang diuraikan dalam fungsi *fun* sesuai dengan *inequality constraint* linear $A \cdot x \leq b$, dengan x0 bisa berupa skalar, vector atau matrix.

2. $x = \text{fmincon}(\text{fun}, x0, A, b, Aeq, beq)$

Meminimalkan subjek fun sesuai dengan persamaan linear $Aeq*x = beq$ dan $A*x \leq b$. Jika tidak ada *inequality constraint*, maka $A = []$ dan $B = []$.

3. $x = \text{fmincon}(\text{fun}, x0, A, b, Aeq, beq, lb, ub)$

Medefinisikan batas bawah dan batas atas dalam menentukan variabel x , sehingga solusinya akan selalu dalam batasan $lb \leq x \leq ub$. Jika tidak ada *equality constraint*, maka $Aeq = []$ dan $beq = []$, dan jika batas bawah x tidak ada maka $lb = -\text{inf}$ dan jika batas atas x tidak ada maka $ub = \text{inf}$.

4. $x = \text{fmincon}(\text{fun}, x0, A, b, Aeq, beq, lb, ub, \text{nonlcon})$

Meminimalkan subject sesuai *inequality constraint non-linear* $c(x)$ atau *equality constraint* $CEQ(x)$ yang didefinisikan dalam *nonlcon*. fmincon mengoptimalkan subject dengan memenuhi $c(x) \leq 0$ dan $CEQ(x) = 0$. Jika tidak ada batas nilai untuk x maka $lb = []$ dan $ub = []$.

5. $x = \text{fmincon}(\text{fun}, x0, A, b, Aeq, beq, lb, ub, \text{nonlcon}, \text{options})$

Meminimalkan subject dengan pilihan optimasi yang ditentukan dalam *options*. Jika tidak ada *equality dan inequality constraint non-linear* maka $\text{nonlcon} = []$.

6. $x = \text{fmincon}(\text{problem})$

Untuk menemukan nilai minimum dari *problem*, dimana *problem* adalah struktur yang dijelaskan dalam input argument.

7. $[x, fval] = \text{fmincon}(\dots)$

Mengembalikan nilai fungsi obyektif *fun* pada solusi x .

8. $[x, fval, \text{exitflag}] = \text{fmincon}(\dots)$

Mengembalikan nilai *exitflag* yang mendeskripsikan kondisi keluaran fmincon .

9. $[x, fval, \text{exitflag}, \text{output}] = \text{fmincon}(\dots)$

Mengembalikan struktur keluaran dengan informasi tentang optimasi.

10. $[x, fval, \text{exitflag}, \text{output}, \text{lambda}] = \text{fmincon}(\dots)$

Mengembalikan struktur lambda dengan pengali Lagrange yang berisi solusi x .

11. $[x, fval, \text{exitflag}, \text{output}, \text{lambda}, \text{grad}] = \text{fmincon}(\dots)$

Mengembalikan nilai *gradient* fungsi *fun* sebagai solusi x .

12. $[x, fval, \text{exitflag}, \text{output}, \text{lambda}, \text{grad}, \text{hessian}] = \text{fmincon}(\dots)$

Mengembalikan nilai *hessian* sebagai solusi x .

3.3 Penerapan *Sequential Quadratic Programming* pada Aliran Daya Optimal Dinamis dengan Penyimpan Energi

1. Fungsi objektif :

$$\min \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^{ng} F_i^t(P_{gi}^t) \right) \quad (3.1)$$

$$F_i(P_i) = a_i P_{gi}^2 + b_i P_{gi} + c_i \quad (3.2)$$

Keterangan:

$F_i^t(P_{gi}^t)$ = Besar biaya pembangkitan pada pembangkit ke-i pada waktu ke-t

P_{gi}^t = Daya output dari pembangkit ke-i pada waktu ke-t

T = jumlah rentang waktu beban

ng = jumlah generator

a_i, b_i, c_i = koefisien biaya pembangkitan ke-i

2. Equality constraint

$$P_i^t = P_{gi}^t - P_{di}^t = \sum_{j=1}^n V_i^t V_j^t (G_{ij} \cos \theta_{ij}^t + B_{ij} \sin \theta_{ij}^t) \quad (3.3)$$

$$Q_i^t = Q_{gi}^t - Q_{di}^t = \sum_{j=1}^n V_i^t V_j^t (G_{ij} \sin \theta_{ij}^t - B_{ij} \cos \theta_{ij}^t) \quad (3.4)$$

Active Power Balance dirumuskan dengan persamaan 3.3 dan 3.4, dimana $i = 1, 2, 3, \dots, n$ menyatakan jumlah bus. P_i^t dan Q_i^t menyatakan injeksi daya aktif dan reaktif di bus i pada waktu ke-t. P_{di}^t dan Q_{di}^t menyatakan daya aktif dan reaktif beban di bus i pada waktu ke-t.

3. Inequality constraint

Batasan pembangkitan daya untuk generator

$$P_{gi}^{min} \leq P_{gi}^t \leq P_{gi}^{max} \quad (3.5)$$

$$Q_{gi}^{min} \leq Q_{gi}^t \leq Q_{gi}^{max} \quad (3.6)$$

Batasan tegangan

$$V_i^{min} \leq V_i^t \leq V_i^{max} \quad (3.7)$$

$$\theta_i^{min} \leq \theta_i^t \leq \theta_i^{max} \quad (3.8)$$

Batasan aliran daya saluran

$$S_l^t \leq S_l^{max} \quad (3.9)$$

Batasan *ramp rate*

$$-\delta_i \leq P_{gi}^{t+1} - P_{gi}^t \leq \delta_i \quad (3.10)$$

Variabel kontrol adalah variable yang akan dioptimasi. Pada permasalahan ACOPT, variabel kontrol berupa magnitude dan sudut tegangan serta daya aktif dan reaktif pembangkitan generator. Variabel kontrol ini berupa vektor x . Jika nb adalah jumlah bus, ng adalah jumlah generator, maka jumlah variabel adalah n , dimana $n = 2nb + 2ng$. Contoh jika $nb = 3$, $ng = 2$, maka ukuran matriks variabel kontrol atau x adalah $[10,1]$. Sehingga dapat dituliskan seperti persamaan 3.11.

$$x = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ P_{g1} \\ P_{g2} \\ Q_{g1} \\ Q_{g2} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

3.3.1 Inisialisasi x_0 sebagai nilai awal

Pemograman optimasi dengan fungsi `fmincon` membutuhkan input argument x_0 sebagai nilai awal untuk memulai proses pencarian variable yang akan dioptimasi. Ukuran x_0 ini sama dengan ukuran vektor x . Untuk level beban= t maka ukuran matriks x_0 adalah $[2nb + 2ng) \times 2, 1]$. Contoh jika $nb = 3$, $ng = 2$, dan level beban = t , maka matriks x_0 adalah seperti persamaan 3.12.

$$x_0 = \begin{bmatrix} \theta_{1\ 1} \\ \theta_{2\ 1} \\ \theta_{3\ 1} \\ v_{1\ 1} \\ v_{2\ 1} \\ v_{3\ 1} \\ P_{g1\ 1} \\ P_{g2\ 1} \\ Q_{g1\ 1} \\ Q_{g2\ 1} \\ \vdots \\ \theta_{1\ t} \\ \theta_{2\ t} \\ \theta_{3\ t} \\ v_{1\ t} \\ v_{2\ t} \\ v_{3\ t} \\ P_{g1\ t} \\ P_{g2\ t} \\ Q_{g1\ t} \\ Q_{g2\ t} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

3.3.2 Pembentukan Vektor lb dan ub

Pada DOPF variabel yang akan dioptimasi berupa sudut dan magnitude tegangan, daya aktif dan daya reaktif. Vektor lb adalah batas bawah variabel kontrol. Vektor ub adalah batas atas variabel kontrol. Dua vektor ini terdiri dari variabel-variabel yang sama dengan yang dimiliki pada DOPF. Dengan vektor lb dan ub, proses optimasi dapat menyesuaikan constraint yang diberikan. Pada level beban = t, panjang matriks lb dan ub harus sesuai dengan matriks x pada level beban = t.

$$\begin{bmatrix} \theta_{1min}^t \\ \theta_{2min}^t \\ \theta_{3min}^t \\ v_{1min}^t \\ v_{2min}^t \\ v_{3min}^t \\ P_{g1min}^t \\ P_{g2min}^t \\ Q_{g1min}^t \\ Q_{g2min}^t \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \theta_1^t \\ \theta_2^t \\ \theta_3^t \\ v_1^t \\ v_2^t \\ v_3^t \\ P_{g1}^t \\ P_{g2}^t \\ Q_{g1}^t \\ Q_{g2}^t \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \theta_{1max}^t \\ \theta_{2max}^t \\ \theta_{3max}^t \\ v_{1max}^t \\ v_{2max}^t \\ v_{3max}^t \\ P_{g1max}^t \\ P_{g2max}^t \\ Q_{g1max}^t \\ Q_{g2max}^t \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

3.3.3 Pembentukan f dan df

$$f = \sum_{i=1}^{jam} fi \quad (3.14)$$

f adalah nilai total biaya pembangkitan. Nilai f didapat dari penjumlahan biaya pembangkitan untuk setiap level beban yang dinyatakan dengan persamaan 3.14. Sedangkan df adalah turunan dari fungsi f . Matriks df dituliskan dengan persamaan 3.15. Pada level beban = t , panjang matriks df harus sesuai dengan matriks df pada level beban = t .

$$df = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{df}{P_{g1}} \\ \frac{df}{P_{g2}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

3.3.4 Pembentukan Matriks geq dan $dgeq$

Matriks geq adalah matriks persamaan power balance sistem. Untuk sistem dengan 3 bus ($nb=3$), 2 generator ($ng=2$) dan 2 beban yang terletak di bus 1 dan 3, maka matriks awal dari geq dapat dilihat pada persamaan 3.16.

$$geq = \begin{bmatrix} P_{d1} \\ 0 \\ P_{d2} \\ Q_{d1} \\ 0 \\ Q_{d2} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Untuk level beban = t , ukuran matriks geq menjadi $[2nb*t, 1]$, sehingga matriks geq menjadi seperti persamaan 3.17.

$$geq = \begin{bmatrix} P_{d1\ 1} \\ 0 \\ P_{d2\ 1} \\ Q_{d1\ 1} \\ 0 \\ Q_{d2\ 1} \\ \vdots \\ P_{d1\ t} \\ 0 \\ P_{d2\ t} \\ Q_{d1\ t} \\ 0 \\ Q_{d2\ t} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Sedangkan $dgeq$ adalah turunan dari matriks geq , ukuran matriks $dgeq$ adalah $[(2nb+2ng)*2, 2nb*2]$. Pada matriks $dgeq$ setiap bagian diturunkan terhadap bagian tersebut, sehingga bagian yang lain menjadi nol. Misal dengan b = jumlah bus dan m = jumlah generator, maka matriks $dgeq$ dapat dituliskan seperti persamaan 3.18.

Aktif power balance reaktif power balance

$$degq = \begin{bmatrix} \frac{geq}{d\theta_{11}} & \dots & \frac{geq}{d\theta_{1b}} & \frac{geq}{d\theta_{11}} & \dots & \frac{geq}{d\theta_{1b}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{geq}{d\theta_{b1}} & \dots & \frac{geq}{d\theta_{bb}} & \frac{geq}{d\theta_{b1}} & \dots & \frac{geq}{d\theta_{bb}} \\ \frac{geq}{dv_{11}} & \dots & \frac{geq}{dv_{1b}} & \frac{geq}{dv_{11}} & \dots & \frac{geq}{dv_{1b}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{geq}{dv_{b1}} & \dots & \frac{geq}{dv_{bb}} & \frac{geq}{dv_{b1}} & \dots & \frac{geq}{dv_{bb}} \\ \frac{geq}{dP_{g1}} & \dots & \frac{geq}{dP_{g1}} & \frac{geq}{dP_{g1}} & \dots & \frac{geq}{dP_{g1}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{geq}{dP_{gm}} & \dots & \frac{geq}{dP_{gm}} & \frac{geq}{dP_{gm}} & \dots & \frac{geq}{dP_{gm}} \\ \frac{geq}{dQ_{g1}} & \dots & \frac{geq}{dQ_{g1}} & \frac{geq}{dQ_{g1}} & \dots & \frac{geq}{dQ_{g1}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{geq}{dQ_m} & \dots & \frac{geq}{dQ_m} & \frac{geq}{dQ_m} & \dots & \frac{geq}{dQ_m} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Untuk level beban = t maka matriks $dgeq$ disusun dibawah secara diagonal. Sehingga ukuran matriks $dgeq$ menjadi $[(2nb+2ng)*t : 2nb*t]$, Persamaan 3.19 merupakan matriks $dgeq$ dengan periode lebih dari satu jam.

$$degq = \begin{bmatrix} dgeq_1 & zeros & zeros & zeros \\ zeros & dgeq_2 & zeros & zeros \\ zeros & zeros & \ddots & zeros \\ zeros & zeros & zeros & dgeq_t \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

3.3.5 Pembentukan Matriks g, dg, dan Af

Matriks g dan dg adalah persamaan *inequality constraint* pada AC-OPF. Matriks ini adalah batasan aliran daya dengan from bus dan to bus limit. Misal untuk sistem dengan 3 bus, 2 generator dan 3 saluran (nbr=3), maka matriks g dirumuskan seperti persamaan 3.20 dimana Sf adalah

aliran daya from bus dan St adalah aliran daya to bus. Untuk level beban = t , maka matriks g dirumuskan seperti persamaan 3.21.

$$g = \begin{bmatrix} Sf_1 \\ Sf_2 \\ Sf_3 \\ St_1 \\ St_2 \\ St_3 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$g = \begin{bmatrix} Sf_{1\ 1} \\ Sf_{2\ 1} \\ Sf_{3\ 1} \\ St_{1\ 1} \\ St_{2\ 1} \\ St_{3\ 1} \\ \vdots \\ Sf_{1\ t} \\ Sf_{2\ t} \\ Sf_{3\ t} \\ St_{1\ t} \\ St_{2\ t} \\ St_{3\ t} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Matriks dg adalah turunan dari g , misal dengan b = jumlah bus, m = jumlah generator dan br = jumlah saluran maka matriks dg dirumuskan dengan persamaan 3.22. Untuk level beban = t maka matriks dg disusun dibawah secara diagonal. Sehingga ukuran matriks dg menjadi $[(2nb+2ng)*t : 2nbr*t]$. Pada persamaan 3.23, dirumuskan matriks dg dengan periode lebih dari satu jam.

Matrik Af dapat menyatakan matriks *ramp rate*. Batasan *ramp rate* dimasukkan kedalam matriks bf sehingga memenuhi persamaan $Af \times x \leq bf$. Misal untuk sistem dengan jumlah bus = 3, generator = 2 dan level beban = 2, maka matriks untuk kondisi normal ke kondisi normal selanjutnya dirumuskan seperti persamaan 3.24. Pada kondisi kontingensi, *ramp rate* generator menjadi 0,2 dari *ramp rate* saat kondisi normal karena waktu dispatch saat kontingensi terlalu lama jika satu jam, sehingga dibuat 12 menit atau 0,2 jam. Sehingga untuk kondisi normal ke kondisi kontingensi dirumuskan pada persamaan 3.25.

$$\begin{array}{cc}
\text{from bus flow} & \text{to bus flow}
\end{array}$$

$$dg = \begin{bmatrix}
\frac{g}{d\theta_{11}} & \cdots & \frac{g}{d\theta_{1br}} & \frac{g}{d\theta_{11}} & \cdots & \frac{g}{d\theta_{1br}} \\
\vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
\frac{g}{d\theta_{b1}} & \cdots & \frac{g}{d\theta_{bbr}} & \frac{g}{d\theta_{b1}} & \cdots & \frac{g}{d\theta_{bbr}} \\
\vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
\frac{g}{dv_{11}} & \cdots & \frac{g}{dv_{1br}} & \frac{g}{dv_{11}} & \cdots & \frac{g}{dv_{1br}} \\
\vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
\frac{g}{dv_{b1}} & \cdots & \frac{g}{dv_{bbr}} & \frac{g}{dv_{b1}} & \cdots & \frac{g}{dv_{bbr}} \\
\vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
\frac{g}{dP_{g1}} & \cdots & \frac{g}{dP_{g1}} & \frac{g}{dP_{g1}} & \cdots & \frac{g}{dP_{g1}} \\
\vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
\frac{g}{dP_{gm}} & \cdots & \frac{g}{dP_{gm}} & \frac{g}{dP_{gm}} & \cdots & \frac{g}{dP_{gm}} \\
\vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
\frac{g}{dQ_{g1}} & \cdots & \frac{g}{dQ_{g1}} & \frac{g}{dQ_{g1}} & \cdots & \frac{g}{dQ_{g1}} \\
\vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
\frac{g}{dQ_m} & \cdots & \frac{g}{dQ_m} & \frac{g}{dQ_m} & \cdots & \frac{g}{dQ_m}
\end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$$dg = \begin{bmatrix}
dg_1 & \text{zeros} & \text{zeros} & \text{zeros} \\
\text{zeros} & dg_2 & \text{zeros} & \text{zeros} \\
\text{zeros} & \text{zeros} & \ddots & \text{zeros} \\
\text{zeros} & \text{zeros} & \text{zeros} & dg_t
\end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$Af_{ineq \text{ ramp rate}} = \begin{bmatrix}
000000 & 1 & 0 & 00 & 000000 & 1 & 0 & 00 \\
000000 & 0 & 1 & 00 & 000000 & 0 & 1 & 00 \\
000000 & -1 & 0 & 00 & 000000 & -1 & 0 & 00 \\
000000 & 0 & -1 & 00 & 000000 & 0 & -1 & 00
\end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$Af_{ineq \text{ ramp rate}} = \begin{bmatrix}
000000 & 5 & 0 & 00 & 000000 & 5 & 0 & 00 \\
000000 & 0 & 5 & 00 & 000000 & 0 & 5 & 00 \\
000000 & -5 & 0 & 00 & 000000 & -5 & 0 & 00 \\
000000 & 0 & -5 & 00 & 000000 & 0 & -5 & 00
\end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Batasan energi limit baterai digunakan untuk mengatur daya keluaran dari operasi penyimpanan energi. Batasan ini ditentukan oleh SOC dari penyimpanan energi. Selain sebagai penghubung antara kondisi normal dan kondisi kontingensi, energi limit juga merupakan penghubung setiap jamnya kondisi normal. Matriks Af untuk penyimpanan energi untuk dua jam dirumuskan dengan persamaan 3.26.

$$Af_{baterai} = \begin{bmatrix} 00000000 & -1000 & 00000000 & 0000 \\ 00000000 & 1000 & 00000000 & 0000 \\ 00000000 & -1000 & 00000000 & -1000 \\ 00000000 & 1000 & 00000000 & 1000 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$Af = \begin{bmatrix} 000000 & 1 & 0 & 0 & 00 & 0 & 000000 & -1 & 0 & 0 & 00 & 0 \\ 000000 & 0 & 1 & 0 & 00 & 0 & 000000 & 0 & -1 & 0 & 00 & 0 \\ 000000 & 0 & 0 & -1 & 00 & 0 & 000000 & 0 & 0 & 0 & 00 & 0 \\ 000000 & -1 & 0 & 0 & 00 & 0 & 000000 & 1 & 0 & 0 & 00 & 0 \\ 000000 & 0 & -1 & 0 & 00 & 0 & 000000 & 0 & 1 & 0 & 00 & 0 \\ 000000 & 0 & 0 & 1 & 00 & 0 & 000000 & 0 & 0 & 0 & 00 & 0 \\ 000000 & 0 & 0 & 0 & 00 & 0 & 000000 & 0 & 0 & 0 & 00 & 0 \\ 000000 & 0 & 0 & 0 & 00 & 0 & 000000 & 0 & 0 & 0 & 00 & 0 \\ 000000 & 0 & 0 & -1 & 00 & 0 & 000000 & 0 & 0 & -1 & 00 & 0 \\ 000000 & 0 & 0 & 0 & 00 & 0 & 000000 & 0 & 0 & 0 & 00 & 0 \\ 000000 & 0 & 0 & 0 & 00 & 0 & 000000 & 0 & 0 & 0 & 00 & 0 \\ 000000 & 0 & 0 & 1 & 00 & 0 & 000000 & 0 & 0 & 1 & 00 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Pada persamaan 3.27 merupakan matriks Af kondisi normal selama dua jam. Batasan SOC dan *ramp rate* dimasukkan kedalam matriks bf sehingga bf dirumuskan dengan persamaan 3.28.

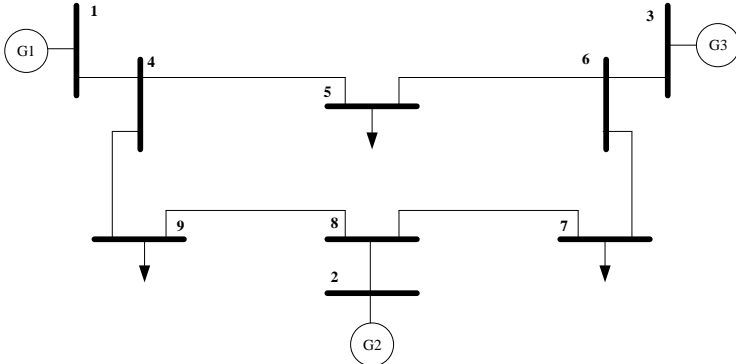
$$bf = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ SOC_{max} \\ \delta_1 \\ \delta_2 \\ SOC_{min} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Persamaan 3.29 merupakan kerja sistem dimana A^1 menunjukkan kondisi normal pada jam pertama, A^{k1} menunjukkan kondisi kontingensi pada jam pertama, dan A^{c1} menunjukkan kondisi load margin 0,2 pada jam pertama. Kondisi normal ke kondisi kontingensi akan di kopling dengan *ramp rate*, kondisi normal ke kondisi load margin 0,2 akan di kopling dengan beban, sedangkan kondisi normal ke normal berikutnya akan di kopling dengan ramp rate dan baterai.

$$Af = \begin{bmatrix} \begin{matrix} A^1 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & & & & \\ 0 & \dots & 0 & & & & \\ 0 & \dots & 0 & & & & \\ 0 & \dots & 0 & & & & \end{matrix} & \begin{matrix} 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & & & \\ 0 & \dots & 0 & & & \\ 0 & \dots & 0 & & & \\ 0 & \dots & 0 & & & \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & & & \\ 0 & \dots & 0 & & & \\ 0 & \dots & 0 & & & \\ 0 & \dots & 0 & & & \end{matrix} & \begin{matrix} 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & & & \\ 0 & \dots & 0 & & & \\ 0 & \dots & 0 & & & \\ 0 & \dots & 0 & & & \end{matrix} \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{Ramp Rate} \\ \text{Battery Limit} \end{matrix} \quad (3.29)$$

BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS

4.1 Sistem IEEE 9 Bus



Gambar 4.1. Sistem IEEE 9 bus

Pada tugas akhir ini, modifikasi sistem IEEE 9 bus digunakan untuk validasi program Aliran Daya Optimal Dinamis dengan Penyimpan Energi mempertimbangkan Batas Keamanan Sistem Dan Kestabilan Tegangan. Single line diagram sistem dapat dilihat pada gambar 4.1. Data sistem yang digunakan dapat dilihat pada tabel 4.1, 4.2, dan 4.3.

Tabel 4.1 Data Bus Sistem Modifikasi IEEE 9 Bus

Bus	Tipe Bus	Pd (MW)	Tegangan (KV)
1	3	0	345
2	2	0	345
3	2	0	345
4	1	0	345
5	1	110	345
6	1	0	345
7	1	120	345
8	1	0	345
9	1	125	345

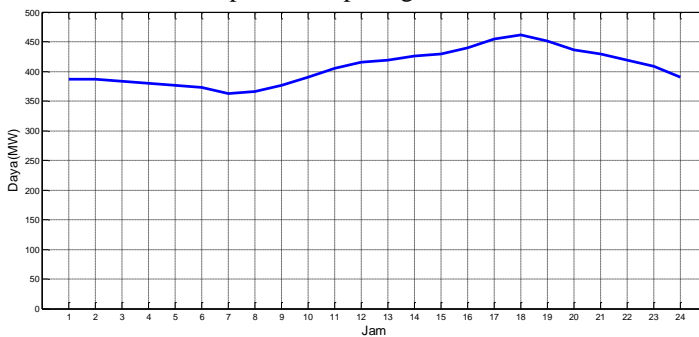
Tabel 4.2 Data Pembangkitan Sistem Modifikasi IEEE 9 Bus

Generator	<i>Cost Function</i>	Pmax (MW)	Pmin (MW)	<i>Ramp rate</i> (MW/jam)
1	$0.11P_1^2 + 5P_1 + 150$	250	10	35
2	$0.085P_2^2 + 1.2P_2 + 600$	270	10	40
3	$0.1225P_3^2 + P_3 + 335$	300	10	30

Tabel 4.3 Data Saluran Sistem Modifikasi IEEE 9 Bus

Saluran	From Bus	To Bus	r	x	Kapasitas (MW)
1	1	4	0	0.0576	250
2	4	5	0.017	0.092	250
3	5	6	0.039	0.17	150
4	3	6	0	0.0586	300
5	6	7	0.0119	0.1008	150
6	7	8	0.0085	0.072	250
7	8	2	0	0.0625	250
8	8	9	0.032	0.161	100
9	9	4	0.01	0.085	250

Beban yang akan digunakan pada sistem ini adalah beban dinamis atau beban yang berubah-ubah dalam interval waktu satu jam. Beban pada sistem IEEE 9 bus ini dapat dilihat pada gambar 4.2.

**Gambar 4.2** Profil Beban sistem IEEE 9 bus

4.2 Pengujian Program Batas Keamanan Sistem

Batas keamanan yang dibuat dalam Tugas Akhir ini adalah batas *ramp rate* dan kontingensi. Dalam Pengujian program batas keamanan sistem, pertama dilakukan validasi. Validasi ini untuk membandingkan hasil AC-DOPF dengan metode Sequential Quadratic Programming dan AC OPF Matpower secara individual. Setelah melewati validasi, akan dilakukan tes validasi *ramp rate*. Pada tahap ini dilakukan dengan membatasi penurunan atau kenaikan daya pembangkitan setiap generator pada jam ke- t sampai $t+1$. Untuk melihat kenaikan atau penurunan daya, beban yang digunakan memiliki selisih yang cukup besar setiap jamnya. Tahap terakhir dalam pengujian program batas keamanan adalah mensimulasikan kondisi kontingensi pada sistem. Pada kondisi kontingensi ini juga ditambahkan batasan *ramp rate* yang besarnya adalah seperlimakali saat normal untuk melindungi sistem.

4.2.1 Validasi

Validasi ini bertujuan untuk membandingkan hasil AC-DOPF dengan metode Sequential Quadratic Programming dan AC OPF Matpower secara individual. Validasi ini dilakukan dengan membandingkan hasil dari 2 level beban yang berbeda. Data level beban yang digunakan dapat dilihat pada tabel 4.4.

Pada awal simulasi AC-DOPF ini tidak ada batasan *ramp rate* dan simulasi dilakukan saat kondisi normal. Hasil simulasi dapat dilihat pada tabel 4.5. Dari hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai sudut tegangan (θ), tegangan (V), daya aktif (P), daya reaktif (Q), total pembangkitan, dan biaya AC-DOPF sama dengan hasil simulasi AC OPF secara individual. Dapat disimpulkan bahwa program AC-DOPF dengan metode Sequential Quadratic Programming dapat digunakan untuk perhitungan Aliran Daya Optimal arus bolak-balik dengan baik.

Tabel 4.4 Data Level Beban untuk Validasi

Jam ke-	Beban (MW)			Total (MW)
	Bus 5	Bus 7	Bus 9	
1	110	120	125	355
2	126.5	138	143.75	408.25

Tabel 4.5 Perbandingan hasil AC-DOPF dan AC OPF

Variabel Output	ACOPF		AC-DOPF	
	Jam 1	Jam 2	Jam 1	Jam 2
01	0	0	0	0
02	5.15	5.697	5.15	5.697
03	3.075	3.254	3.075	3.254
04	-2.823	-3.33	-2.823	-3.33
05	-4.974	-5.869	-4.974	-5.869
06	0.112	-0.116	0.112	-0.116
07	-1.934	-2.459	-1.934	-2.459
08	0.865	0.58	0.865	0.58
09	4.93	-5.835	4.93	-5.835
V1	1.1	1.1	1.1	1.1
V2	1.099	1.1	1.099	1.1
V3	1.088	1.094	1.088	1.094
V4	1.093	1.088	1.093	1.088
V5	1.081	1.072	1.081	1.072
V6	1.1	1.1	1.1	1.1
V7	1.088	1.083	1.088	1.083
V8	1.1	1.096	1.1	1.096
V9	1.071	1.059	1.071	1.059
P1	102.83	120.66	102.83	120.66
P2	150.54	172.14	150.54	172.14
P3	105.58	120.7	105.58	120.7
Q1	15	26.92	15	26.92
Q2	3.45	13.86	3.45	13.86
Q3	-19.42	-7.97	-19.42	-7.97
Total Daya (MW)	358.94	413.5	358.94	413.5
Total Biaya (\$)	6340.18	7920.47	6340.18	7920.47

4.2.2 Analisis Kontingensi

Analisis kontingensi sangat penting dalam pembahasan aliran daya optimal dengan batas keamanan sistem. Analisis ini dilakukan pada setiap saluran. Saluran yang memiliki dampak yang besar pada sistem dapat

terlihat dari total biaya pembangkitan yang dihasilkan. Biaya pembangkitan yang paling tinggi menandakan bahwa kontingensi pada saluran tersebut memberikan efek yang besar terhadap sistem saat kondisi kontingensi.

Hasil simulasi ditunjukkan pada tabel 4.6. Dari simulasi tersebut dapat dilihat bahwa saluran yang memiliki dampak terbesar pada sistem modifikasi IEEE 9 bus ini, dampak yang besar adalah saluran 7. Selanjutnya, saluran 7 akan dipakai sebagai saluran yang memiliki setengah kali kapasitas dan dua kali impedansi saluran saat kondisi normal.

Tabel 4.6 Daftar dampak kontingensi sistem IEEE 9 bus

Saluran	From Bus	To Bus	Biaya (\$)
1	1	4	6482.1
2	4	5	6557.9
3	5	6	6898.9
4	3	6	6814.3
5	6	7	6700.9
6	7	8	6735.7
7	8	2	7291.4
8	8	9	7235.5
9	9	4	6494.4

4.2.3 Pengujian Program *Ramp rate*

Pada bagian ini, program AC-DOPF tahap validasi ditambahkan dengan batasan *ramp rate*. Batasan ini akan membatasi kenaikan atau penurunan daya setiap generator pada jam t ke jam $t + 1$. Analisis simulasi dilakukan dengan membandingkan selisih daya pembangkitan setiap generator saat menggunakan *ramp rate* dan saat tidak menggunakan *ramp rate* dengan total simulasi selama 6 jam. Analisis juga dilakukan dengan membandingkan total biaya sistem saat menggunakan *ramp rate* dan saat tidak menggunakan *ramp rate*.

Tabel 4.7 Profil beban untuk validasi *ramp rate*

Jam ke-	1	2	3	4	5	6
Total beban	355	450.85	521.85	426	486.35	390.5

Tabel 4.8 Daya pembangkitan tanpa batasan *ramp rate*

Pembangkit	Daya pembangkitan pada jam ke-					
	1	2	3	4	5	6
G1	102.83	135.04	166.36	126.64	147.18	114.7
G2	150.54	189.44	211.48	179.34	203.83	164.94
G3	105.57	132.84	152.64	125.75	142.96	115.65

Tabel 4.9 Daya pembangkitan dengan batasan *ramp rate*

Pembangkit	Daya pembangkitan pada jam ke-					
	1	2	3	4	5	6
G1	104.93	134.93	164.93	134.93	145.95	115.95
G2	149.38	189.38	209.19	174.3	204.38	164.38
G3	104.57	133.01	156.4	122.23	143.69	114.92

Tabel 4.10 Perubahan daya pembangkitan tanpa batasan *ramp rate*

Pembangkit	<i>Ramp rate</i> (MW)	Perubahan daya antara jam-				
		1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
G1	30	32.21	31.32	-39.72	20.54	-32.48
G2	40	38.9	22.04	-32.14	24.49	-38.89
G3	35	27.27	19.8	-26.89	17.21	-27.31

Tabel 4.11 Perubahan daya pembangkitan dengan batasan *ramp rate*

Pembangkit	<i>Ramp rate</i> (MW)	Perubahan daya antara jam-				
		1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
G1	30	30	30	-30	11.02	-30
G2	40	40	19.81	-34.89	30.08	-40
G3	35	28.44	23.39	-34.17	21.46	-28.77

Tabel 4.12 Perbedaan total biaya pembangkitan

Menggunakan <i>ramp rate</i> ?	Biaya Total pembangkitan
Ya	54208.5350
Tidak	54193.0497

Pada tabel 4.7 adalah data level beban yang digunakan untuk membuktikan fungsi program *ramp rate*. Tabel 4.8 dan 4.9 menunjukkan hasil simulasi pembangkitan daya setiap generator. Dari hasil ini kemudian dihitung selisih pembangkitan pada jam ke- $t+1$ dengan jam ke- t . Selisih pembangkitan tiap jam dapat dilihat pada tabel 4.10 dan 4.11.

Dari perhitungan ini dapat dilihat bahwa program dengan batasan *ramp rate* ini dapat berjalan dengan baik saat kenaikan maupun penurunan beban. Dari segi biaya, menggunakan batasan *ramp rate* membuat total biaya pembangkitan menjadi lebih mahal karena batasan ini memaksa generator untuk tidak menaikkan atau menurunkan daya pembangkitan melebihi batasan yang telah ada seperti pada tabel 4.11.

4.2.4 Pengujian Program Kontingensi

Tahap ini dilakukan dengan memberikan kontingensi pada sistem. Hal ini dilakukan untuk mengetahui apakah saat terjadi kontingensi sistem dapat mempertahankan batasan yang telah dibuat. Kondisi kontingensi dianalisis saat terjadi kontingensi pada saluran yang memiliki dampak terbesar saat terjadi kontingensi. Seperti yang telah dijelaskan pada subbab 4.2.2, dampak terbesar pada kondisi kontingensi terjadi pada saluran ke-7. Level beban untuk kondisi kontingensi ini diambil dari profil beban sistem IEEE 9 bus pada gambar 4.2. Level beban yang digunakan adalah selama 6 jam.

Dari tabel 4.14 dan 4.15 dapat dilihat perbedaan antara pembangkitan kondisi normal tanpa kontingensi dan dengan mempertimbangkan kontingensi. Saat mempertimbangkan kontingensi, pembangkitan generator saat kondisi normal akan menyesuaikan dengan daya pembangkitan saat kontingensi yang bernilai lebih tinggi yang dapat dilihat pada tabel 4.16. Sehingga *re-dispatch* saat terjadi kontingensi tidak terjadi pelanggaran pada batasan *ramp rate*. Perubahan daya pembangkitan normal ke kontingensi dapat dilihat pada tabel 4.17. *Ramp rate* pada kondisi ini adalah seperlima kali dari kondisi normal karena pada saat kontingensi sistem harus cepat menanggapi kondisi kontingensi.

Perbandingan total biaya dapat dilihat pada tabel 4.18. saat mempertimbangkan kondisi kontingensi, daya pembangkitan generator menjadi lebih tinggi sehingga biaya pembangkitan menjadi lebih mahal sampai 4,7% dibandingkan dengan kondisi normal tanpa kontingensi. Hal ini terjadi karena saat kontingensi, prioritas utama adalah keamanan sistem sehingga aspek ekonomi diabaikan pada kondisi ini.

Tabel 4.13 Level beban untuk validasi kontingensi

jam ke-	1	2	3	4	5	6
Total beban	355	408.25	426	436.65	418.9	408.25

Tabel 4.14 Daya pembangkitan kondisi normal tanpa kontingensi

Pembangkit	Daya pembangkitan pada jam ke-					
	1	2	3	4	5	6
P1	131.44	136.26	138.68	135.05	130.24	127.84
P2	185.11	190.87	193.75	189.43	183.67	180.79
P3	129.8	133.85	135.88	132.84	128.79	126.77

Tabel 4.15 Daya pembangkitan kondisi normal dengan kontingensi

Pembangkit	Daya pembangkitan pada jam ke-					
	1	2	3	4	5	6
P1	158.49	166.27	170.19	164.33	156.53	152.65
P2	132.93	132.93	132.93	132.93	132.93	132.93
P3	154.18	160.95	164.31	159.25	152.5	149.12

Tabel 4.16 Daya pembangkitan kondisi kontingensi

Pembangkit	Daya pembangkitan pada jam ke-					
	1	2	3	4	5	6
P1	162.43	170.33	174.33	168.36	160.41	156.54
P2	124.93	124.93	124.93	124.93	124.93	124.93
P3	158.26	164.94	168.25	163.27	156.63	153.22

Tabel 4.17 Perubahan daya pembangkitan normal ke kontingensi

Pembangkit	Ramp rate	Daya pembangkitan pada jam ke-					
		1	2	3	4	5	6
P1	6	3.94	4.06	4.14	4.03	3.88	3.89
P2	8	-8	-8	-8	-8	-8	-8
P3	7	4.08	3.99	3.94	4.02	4.13	4.1

Tabel 4.18 Total Biaya pembangkitan

Normal tanpa kontingensi	54949.89
Normal dengan kontingensi	57552.08
Kontingensi	58391.16

4.3 Pengujian Program Batas Keamanan dan Kestabilan Tegangan

Program batas keamanan sistem telah divalidasi pada 4.2. akan ditambahkan dengan pertimbangan operasi sistem, yaitu analisis kestabilan tegangan. Analisis ini dilakukan dengan meningkatkan level beban saat kondisi normal dengan *load margin* (λ) 0,2.

Dengan penambahan *load margin* 0,2 level beban sistem naik sesuai dengan tabel 4.19. Pembangkitan masing-masing generator pada kondisi normal, kondisi kontingensi, dan saat kondisi load margin 0,2 dapat dilihat pada tabel 4.20, 4.21, dan 4.22.

Pada tabel 4.23 dan 4.24 adalah perbedaan pembangkitan generator pada jam ke- t dan jam ke- $t+1$ saat normal dan perbedaan pembangkitan saat normal-kontingensi. Batasan *ramp rate* saat kondisi normal-normal dan normal-kontingensi dapat terpenuhi.

Tabel 4.19 Data beban dengan *Load Margin* 0,2

jam ke-	1	2	3	4	5	6
Total beban	528.24	545.28	553.8	541.02	523.98	515.46

Tabel 4.20 Daya pembangkitan generator kondisi normal

Pembangkit	Daya pembangkitan pada jam ke-					
	1	2	3	4	5	6
P1	158.48	166.27	170.35	164.33	156.54	152.65
P2	132.93	132.93	132.93	132.93	132.93	132.93
P3	154.18	160.94	164.15	159.25	152.49	149.12

Tabel 4.21 Daya pembangkitan generator kondisi kontingensi

Pembangkit	Daya pembangkitan pada jam ke-					
	1	2	3	4	5	6
P1	164.45	172.22	176.3	170.28	162.54	158.5
P2	124.93	124.93	124.93	124.93	124.93	124.93
P3	156.18	162.99	166.21	161.29	154.44	151.2

Tabel 4.22 Daya pembangkitan generator dengan *Load Margin* (λ) 0,2

Pembangkit	Daya pembangkitan pada jam ke-					
	1	2	3	4	5	6
P1	186.29	195.76	200.35	193.39	183.93	179.21
P2	172.93	172.93	172.93	172.93	172.93	172.93
P3	177.23	185.34	189.57	183.31	175.2	171.15

Tabel 4.23 Perubahan daya pembangkitan kondisi normal-normal

Pembangkit	<i>Ramp rate</i>	Daya pembangkitan pada jam ke-				
		1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
P1	30	7.79	4.08	-6.02	-7.79	-3.89
P2	40	0	0	0	0	0
P3	35	6.76	3.21	-4.9	-6.76	-3.37

Tabel 4.24 Perubahan daya pembangkitan normal ke kontingensi

Pembangkit	<i>Ramp rate</i>	Daya pembangkitan pada jam ke-					
		1	2	3	4	5	6
P1	30	5.97	5.95	5.95	5.95	6	5.85
P2	40	-8	-8	-8	-8	-8	-8
P3	35	2	2.05	2.06	2.04	1.95	2.08

Analisis kestabilan tegangan dilakukan dengan memberi load margin sebesar 0,2 sehingga terjadi peningkatan beban seperti pada tabel 4.19. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem masih bisa memenuhi batasan-batasan yang ada. Dari hasil simulasi ini dapat disimpulkan

bahwa program Aliran daya optimal dinamis mempertimbangkan batas keamanan dan stabilitas tegangan ini dapat berjalan dengan baik.

4.4 Pengujian Program Penyimpan Energi

Pada Tugas Akhir ini penyimpanan energi yang digunakan adalah baterai. Baterai yang digunakan dianggap memiliki sumber energi yang selalu ada sehingga baterai dapat *charging* kapanpun. Pada tahap ini akan dilakukan validasi terhadap kerja baterai yang berupa *charging* dan *discharging* pada sistem. Validasi dilakukan dengan mensimulasikan program dan menganalisis apakah metode Sequential Quadratic Programming yang digunakan untuk perhitungan aliran daya optimal ini dapat menghasilkan perhitungan daya keluaran baterai tanpa melewati batasan operasi yang berupa SOC baterai. Pengujian dilakukan pada kondisi normal, kondisi kontingensi, serta kondisi kontingensi dan *Load Margin* 0,2, dengan menggunakan data profil beban pada gambar 4.2 selama 6 jam.

4.4.1 Pengujian Program Penyimpan Energi dalam Kondisi Normal

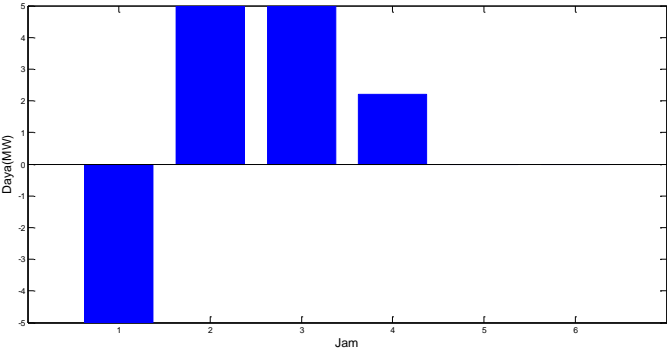
Pada tahap ini validasi program baterai dilakukan saat kondisi normal. Data baterai yang digunakan dapat dilihat pada tabel 4.20. Simulasi ini dilakukan untuk melihat apakah Batasan SOC yang diberikan telah terpenuhi dengan baik atau tidak.

Hasil daya keluaran baterai dapat dilihat pada gambar 4.3 dan 4.4. Dari hasil simulasi ini dapat terlihat bahwa baterai sudah beroperasi sesuai dengan daya *charging* dan *discharging* yang telah dibuat. Gambar 4.5 dan 4.6 adalah hasil dari SOC baterai. Dari hasil simulasi ini dapat terlihat bahwa SOC baterai mempengaruhi kerja baterai. Selain itu, hasil simulasi juga menunjukkan bahwa baterai tidak melanggar batas operasinya atau tidak melebihi Batasan SOCmax dan kurang dari SOCmin. Maka dapat disimpulkan bahwa program Sequential Quadratic Programming yang telah dibuat mampu untuk melakukan perhitungan aliran daya optimal dengan penyimpanan energi pada kondisi normal.

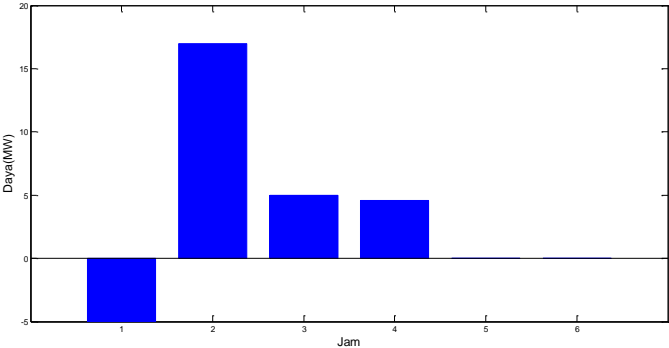
Dari gambar 4.7 dapat dilihat perbedaan pembangkitan generator dengan baterai dan tanpa baterai pada sistem. Baterai membantu pembangkitan generator sehingga daya pembangkitan generator cenderung stabil saat mengalami perubahan beban.

Tabel 4.25 Data Baterai di IEEE 9 bus

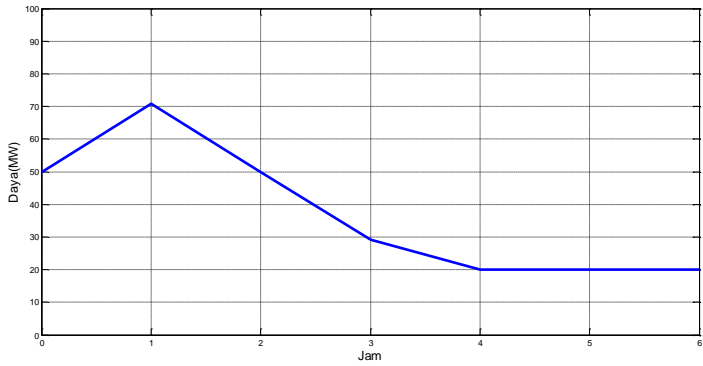
Baterai	Kapasitas (MWh)	SOC awal	SOCmin	SOCmax
A	24	50%	20%	80%
B	24	50%	10%	90%



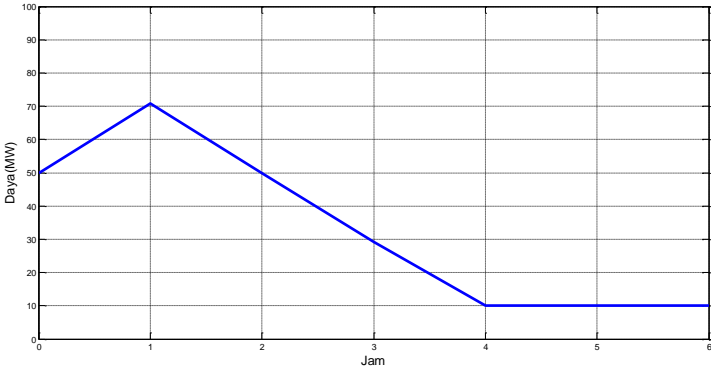
Gambar 4.3 Daya keluaran baterai A



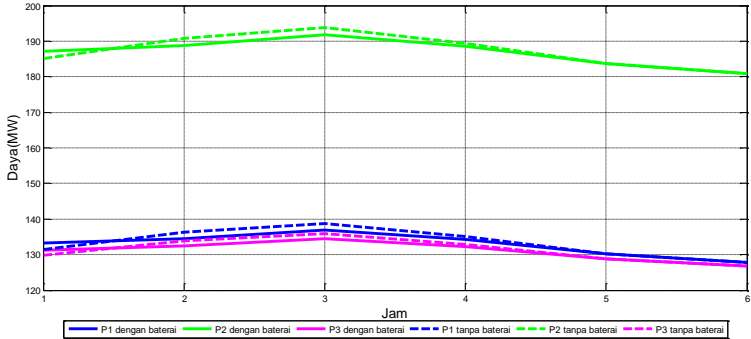
Gambar 4.4 Daya keluaran baterai B



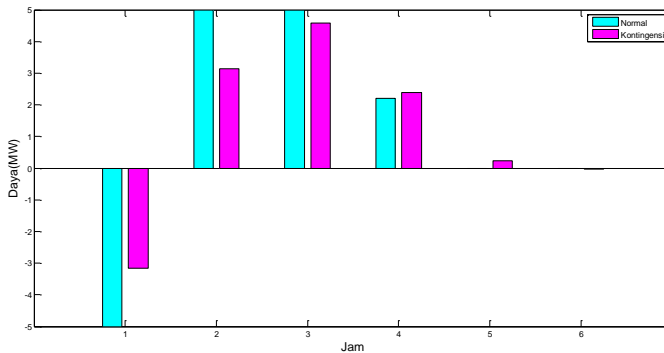
Gambar 4.5 SOC baterai A



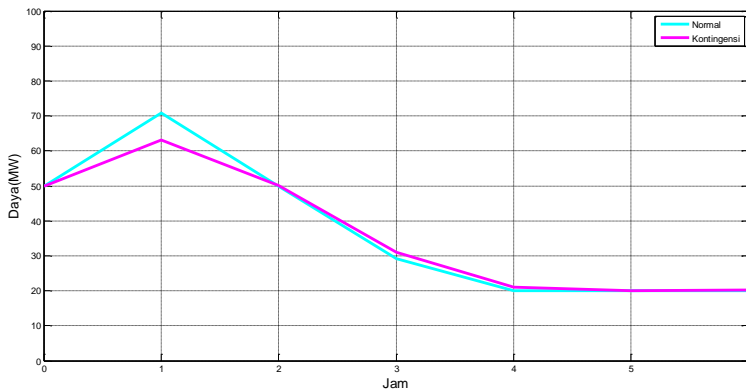
Gambar 4.6 SOC baterai B



Gambar 4.7 Pembangkitan generator dengan baterai dan tanpa baterai



Gambar 4.8 Daya keluaran baterai



Gambar 4.9 SOC baterai

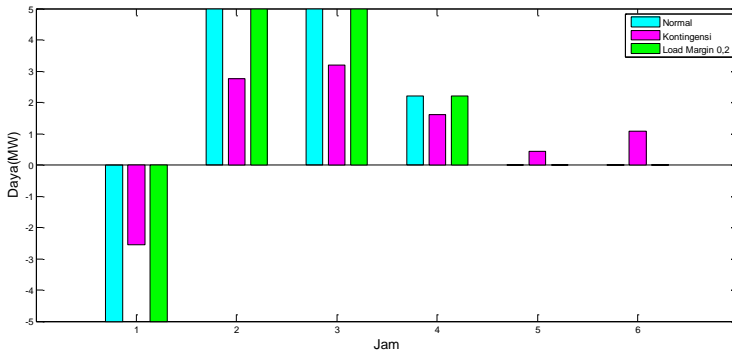
4.4.2 Pengujian Program Penyimpan Energi dengan Batas Keamanan

Program baterai yang digunakan pada tahap sebelumnya selanjutnya disimulasikan dalam kondisi kontingensi. Pada kondisi ini data baterai yang digunakan adalah data baterai A. Daya keluaran baterai dan SOC baterai dapat dilihat pada gambar 4.8 dan 4.9. Batasan SOC yang telah dibuat dapat terpenuhi sehingga dapat disimpulkan bahwa program penyimpan energi pada kondisi kontingensi dapat berjalan dengan baik.

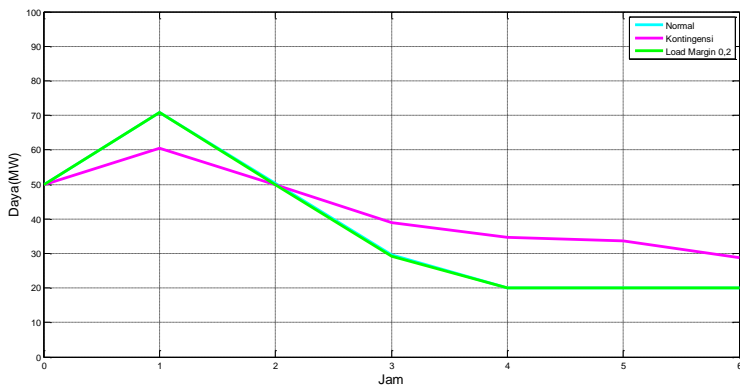
4.4.3 Pengujian Program Penyimpan Energi dengan Batas Keamanan dan Kestabilan Tegangan

Program baterai yang digunakan pada tahap sebelumnya selanjutnya disimulasikan dalam kondisi kontingensi dan *Load Margin* 0,2. Pada kondisi ini data baterai yang digunakan adalah data baterai A.

Pada gambar 4.10 merupakan hasil daya keluaran baterai pada sistem. Pada gambar 4.11 merupakan SOC baterai hasil simulasi. Batasan SOC yang telah dibuat dapat terpenuhi sehingga dapat disimpulkan bahwa program penyimpan energi pada kondisi kontingensi dan *Load Margin* 0,2 dapat berjalan dengan baik.



Gambar 4.10 Daya keluaran baterai



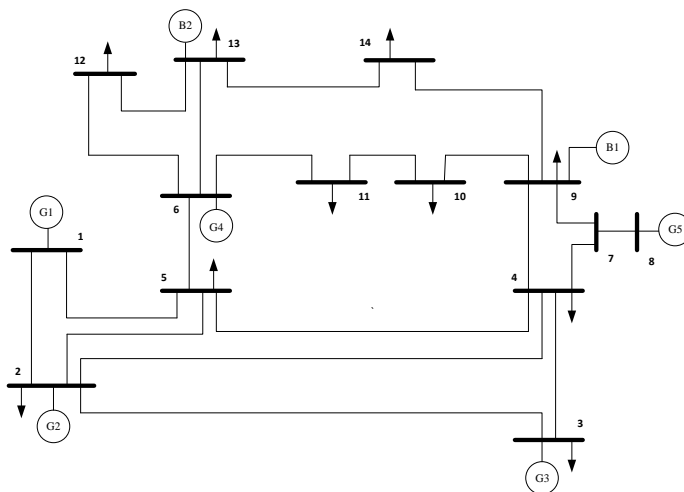
Gambar 4.11 SOC baterai

4.5 Sistem IEEE 14 Bus

Simulasi dengan sistem IEEE 14 bus akan dilakukan untuk melihat pengaruh penambahan penyimpanan energi pada sistem dengan mempertimbangkan batas keamanan sistem dan kestabilan tegangan. Sistem IEEE 14 bus terdiri dari 5 generator. Single line diagram sistem IEEE 14 bus dapat dilihat pada gambar 4.12. Penyimpanan energi yang digunakan adalah baterai yang terletak pada bus 9 dan bus 13. Data baterai yang digunakan dapat dilihat pada tabel 4.29. Profil beban untuk sistem ini dapat dilihat pada gambar 4.13. Pengujian akan dilakukan selama 10 jam sesuai dengan profil beban pada gambar 4.13. Data sistem yang digunakan dapat dilihat pada tabel 4.27 dan 4.28.

Tabel 4.26 Data Generator Sistem Modifikasi IEEE 9 Bus

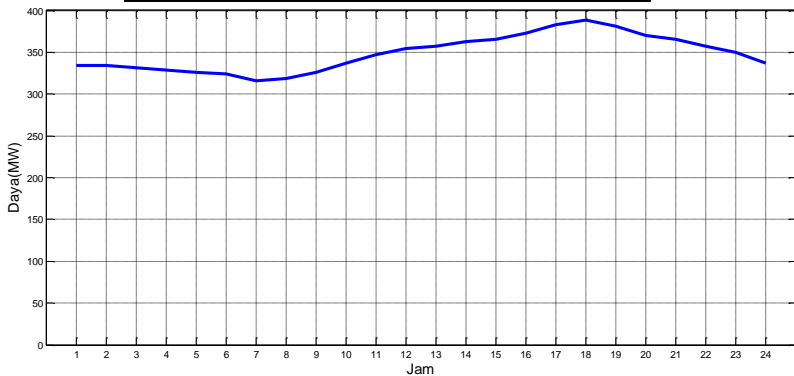
Generator	<i>Cost Function</i>	Pmax (MW)	Pmin (MW)	<i>Ramp rate</i> (MW/jam)
1	$0.0430293P_1^2 + 20P_1$	332.4	10	25
2	$0.25P_2^2 + 20P_2$	140	10	20
3	$0.01P_3^2 + 40P_3$	100	10	10
4	$0.01P_4^2 + 40P_4$	40	10	10
5	$0.01P_5^2 + 40P_5$	40	10	10



Gambar 4.12 Single Line Diagram IEEE 14 bus

Tabel 4.27 Data bus sistem modifikasi IEEE 14 bus

Bus	Tipe Bus	Pd (MW)	Tegangan (KV)
1	3	0	345
2	2	21.7	345
3	2	94.2	345
4	1	47.8	345
5	1	7.6	345
6	2	11.2	345
7	1	0	345
8	2	0	345
9	1	29.5	345
10	1	9	345
11	1	3.5	345
12	1	6.1	345
13	1	13.5	345
14	1	14.9	345



Gambar 4.13 Profil beban sistem IEEE 14 bus

Tabel 4.28 Data Baterai di IEEE 14 bus

Baterai	Kapasitas (MWh)	SOC awal	SOCmin	SOCmax
1	30	50%	20%	90%
2	24	50%	20%	90%

4.5.1 Analisis Kontingensi Sistem IEEE 14 Bus

Analisis ini dilakukan pada setiap saluran. Saluran yang memiliki total biaya pembangkitan yang paling tinggi menandakan bahwa kontingensi pada saluran tersebut memberikan efek yang besar pada sistem saat kondisi kontingensi. Saluran ini yang selanjutnya akan digunakan untuk menganalisis batas keamanan sistem. Daftar dampak kontingensi sistem IEEE 14 bus dapat dilihat pada tabel 4.30. Dari hasil simulasi menunjukkan bahwa saluran pertama adalah saluran yang menghasilkan total biaya yang paling mahal sehingga memiliki dampak yang sangat besar pada sistem saat keadaan kontingensi. Saluran ini selanjutnya yang akan digunakan untuk menganalisis program batas keamanan sistem.

Tabel 4.29 Daftar dampak kontingensi sistem IEEE 14 bus

Saluran	From Bus	To Bus	Biaya (\$)
1	1	2	13858.2
2	1	5	13853.5
3	2	3	13852.1
4	2	4	13852.0
5	2	5	13851.9
6	3	4	13852.5
7	4	5	13852.9
8	4	7	13852.3
9	4	9	13852.4
10	5	6	13852.4
11	6	11	13852.4
12	6	12	13852.4
13	6	13	13852.4
14	7	8	13852.4
15	7	9	13852.4
16	9	10	13852.4
17	9	14	13852.4
18	10	11	13852.4
19	12	13	13852.4
20	13	14	13852.4

4.5.2 Simulasi Program Kondisi Normal pada IEEE 14 Bus

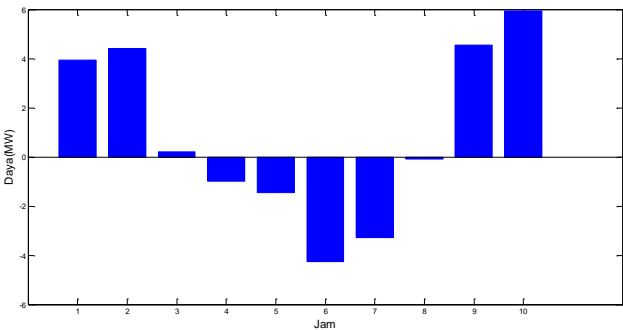
Sistem IEEE 14 bus akan diuji dengan program kondisi normal dengan baterai di sistem dan tanpa baterai. Selanjutnya dilakukan analisis kerja baterai pada kondisi normal dan perbandingan daya pembangkitan masing-masing generator. Level beban yang digunakan adalah pada tabel 4.31. Pada tabel 4.32 adalah perbedaan biaya pembangkitan dengan baterai dan tanpa baterai. Daya keluaran baterai pada sistem dapat dilihat pada gambar 4.14 dan 4.16. SOC baterai dapat dilihat pada gambar 4.15 dan 4.17.

Tabel 4.30 Level beban kondisi normal

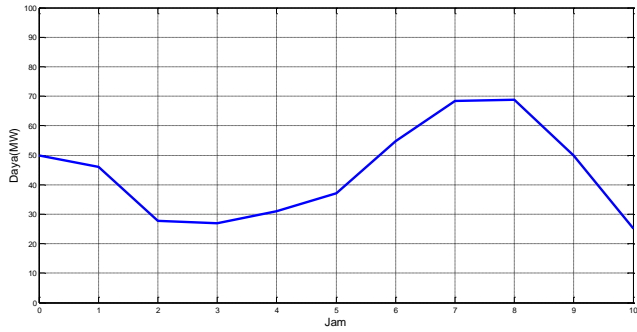
jam ke-	1	2	3	4	5
Total beban	334.11	331.52	328.93	326.34	323.75
jam ke-	6	7	8	9	10
Total beban	315.98	318.57	326.34	336.7	347.06

Tabel 4.31 Biaya pembangkitan kondisi normal

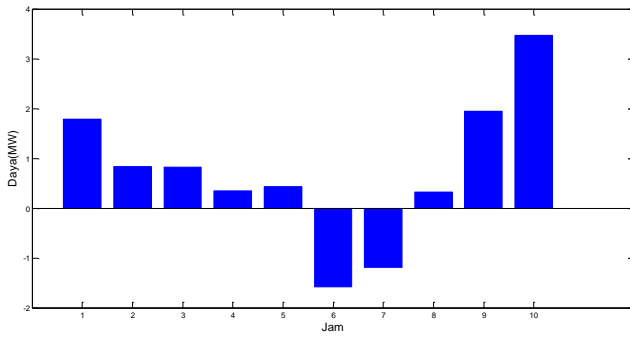
Menggunakan baterai?	Biaya Total pembangkitan
Ya	108500
Tidak	109167



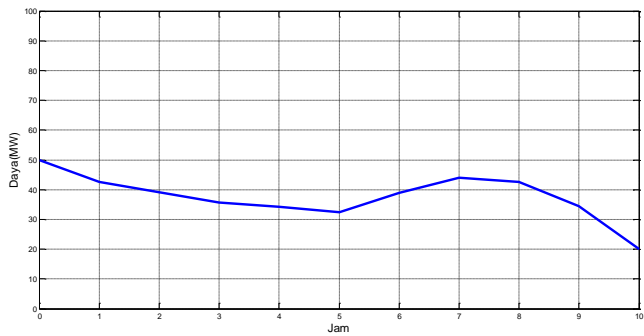
Gambar 4.14 Daya Keluaran Baterai 1



Gambar 4.15 SOC Baterai 1

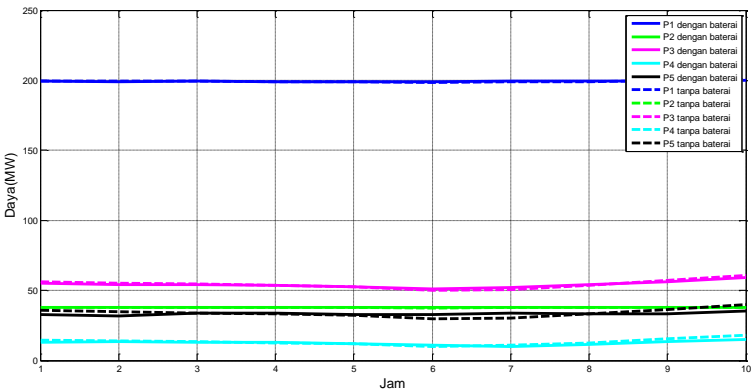


Gambar 4.16 Daya Keluaran Baterai 2



Gambar 4.17 SOC Baterai 1

Pada gambar 4.18 adalah perbedaan pembangkitan masing-masing generator dengan dan tanpa baterai. Grafik dengan garis putus-putus adalah daya pembangkitan generator tanpa baterai pada sistem. Dari gambar 4.18 dapat terlihat bahwa perubahan daya pembangkitan masing-masing generator menjadi berkurang saat dipasang baterai pada sistem sehingga grafik lebih konstan dari pada tanpa baterai.



Gambar 4.18 Perbedaan pembangkitan generator kondisi normal

4.5.3 Simulasi Program Batas Keamanan pada IEEE 14 Bus

Sistem IEEE 14 bus akan diuji dengan program kondisi normal-kontingensi dengan baterai di sistem dan tanpa baterai. Selanjutnya dilakukan analisis kerja baterai pada kondisi normal-kontingensi dan perbandingan daya pembangkitan masing-masing generator. Pada tabel 4.33 adalah perbedaan biaya total pembangkitan saat menggunakan baterai dan tanpa baterai masing-masing pada kondisi normal dan kontingensi.

Tabel 4.32 Biaya pembangkitan kondisi normal-kontingensi

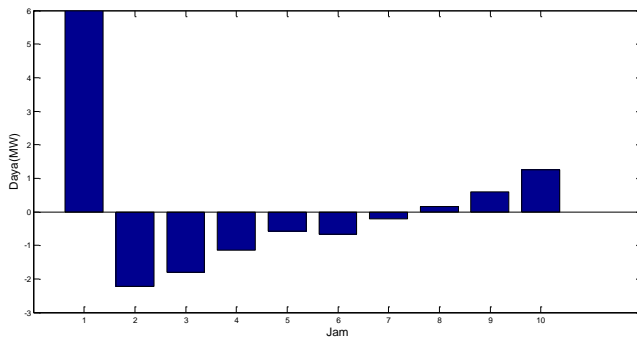
Kondisi	Menggunakan baterai?	Biaya Total pembangkitan
Normal	Ya	113653.5
	Tidak	113525.6
Kontingensi	Ya	113253.8
	Tidak	113552.4

Tabel 4.33 Perubahan daya generator kondisi normal-kontingensi tanpa baterai

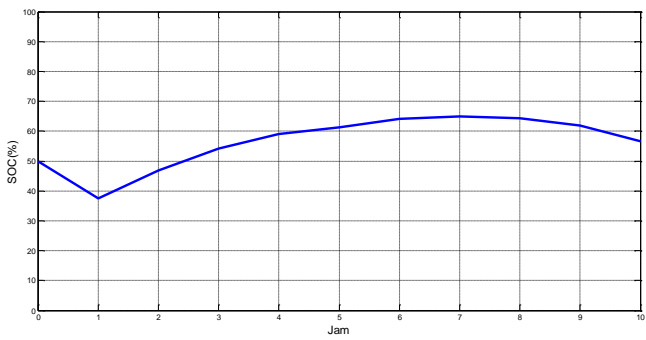
Pembangkit		P1 (MW)	P2 (MW)	P3 (MW)	P4 (MW)	P3 (MW)
Ramp rate		4	4	2	2	2
Daya pembangkitan pada jam ke-	1	-3.66	2.91	0.76	0.11	-0.22
	2	-1.01	0.57	0.15	-0.19	0.02
	3	-0.42	0.21	0.08	0.1	0.01
	4	-0.25	0.12	0.06	0.05	0.01
	5	-0.19	0.1	0.04	0.02	0.01
	6	-0.15	0.07	0.02	0.02	0.01
	7	-0.11	0.06	0.02	0.02	0.01
	8	-0.09	0.06	0.01	0.01	0.01
	9	-0.09	0.06	0.01	0.01	0
	10	-0.08	0.07	0.01	0	0

Tabel 4.34 Perubahan daya generator kondisi normal-kontingensi dengan baterai

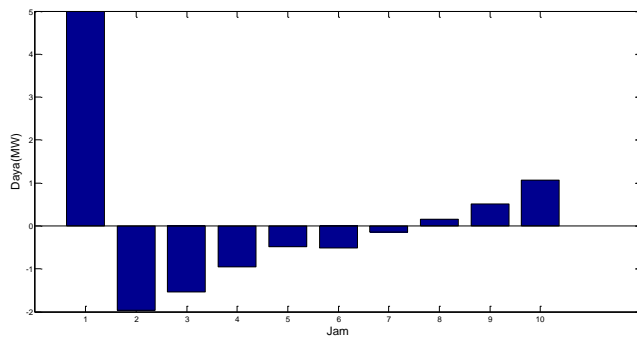
Pembangkit		P1 (MW)	P2 (MW)	P3 (MW)	P4 (MW)	P3 (MW)
Ramp rate		4	4	2	2	2
Daya pembangkitan pada jam ke-	1	-3.52	3.24	1.18	1.32	0.81
	2	-1.57	-0.79	-0.17	-0.06	-0.28
	3	-1.02	-0.79	-0.16	-0.15	-0.24
	4	-0.84	-0.63	-0.12	-0.12	-0.18
	5	-0.7	-0.45	-0.1	-0.11	-0.13
	6	-0.67	-0.44	-0.21	-0.12	-0.12
	7	-0.53	-0.35	-0.09	-0.1	-0.09
	8	-0.43	-0.29	-0.08	-0.09	-0.08
	9	-0.35	-0.21	-0.06	-0.07	-0.07
	10	-0.21	-0.07	-0.01	-0.03	-0.04



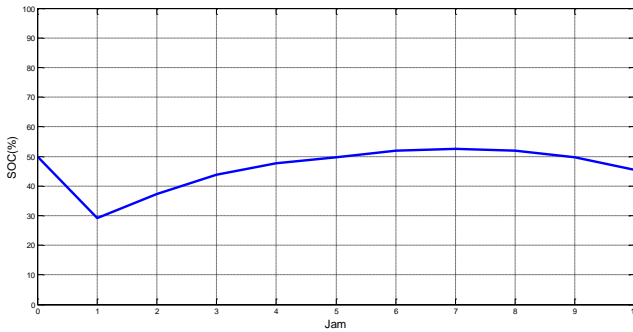
Gambar 4.19 Daya keluaran baterai 1



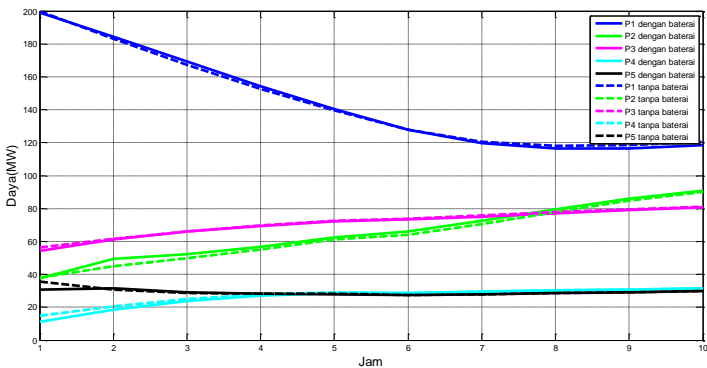
Gambar 4.20 SOC baterai 1



Gambar 4.21 Daya keluaran baterai 2



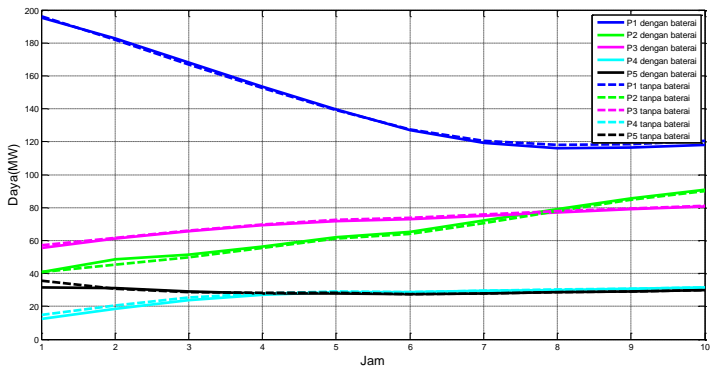
Gambar 4.22 SOC baterai 2



Gambar 4.23 Perbedaan pembangkitan generator kondisi normal

Gambar 4.19 dan 4.21 menunjukkan daya keluaran baterai 1 dan baterai 2 pada kondisi normal dan kontingensi. Gambar 4.20 dan 4.22 adalah SOC baterai 1 dan baterai 2 pada saat keadaan normal dan kontingensi. Pada Gambar 4.23 dapat terlihat perbedaan daya pembangkitan generator dengan baterai dan tanpa baterai pada kondisi normal mempertimbangkan kontingensi. Sedangkan pada gambar 4.24 adalah perbedaan daya pembangkitan generator pada kondisi kontingensi. Dari gambar 4.23 dan 4.24 dapat terlihat bahwa perubahan daya pembangkitan masing-masing generator menjadi berkurang saat dipasang

baterai pada sistem sehingga grafik lebih konstan dari pada tanpa baterai pada masing-masing kondisi.



Gambar 4.24 Perbedaan pembangkitan generator kondisi kontingensi

4.5.4 Simulasi Program Batas Keamanan dan Kestabilan Tegangan pada IEEE 14 Bus

Selanjutnya, sistem IEEE 14 bus akan diuji dengan program batas keamanan sistem dan stabilitas tegangan. Pada analisis kestabilan tegangan dilakukan peningkatan level beban saat kondisi normal dengan *Load Margin* (λ) 0,2. Pengujian ini akan dilakukan selama 10 jam dengan level beban seperti pada tabel 4.31. Analisis kemudian dilakukan dengan membandingkan sistem dengan baterai dan tanpa baterai. Tabel 4.36 adalah level beban yang digunakan untuk analisis stabilitas tegangan. Dengan penambahan *Load Margin* 0,2 level beban sistem naik sesuai dengan tabel 4.31. Dengan adanya kenaikan beban ini, hasil simulasi sistem menunjukkan *no feasible* atau dalam simulasi ada batasan sistem yang tidak terpenuhi saat tidak ada baterai di sistem dan menjadi *feasible* saat dipasang baterai di sistem.

Tabel 4.35 Level beban dengan load margin 0,2

jam ke-	1	2	3	4	5
Total beban	400.932	397.824	394.716	391.608	388.5
jam ke-	6	7	8	9	10
Total beban	379.176	382.284	391.608	404.04	416.472

4.5.5 Analisis

Dari subbab 4.5.1 dan 4.5.4 dapat dilihat perbandingan antara sistem IEEE 14 bus dengan baterai dan tanpa baterai pada kondisi normal. Dari hasil simulasi kedua baterai telah memenuhi batasan SOC. Adanya baterai pada sistem menyebabkan perubahan pembangkitan generator berkurang sehingga grafik perubahan generator setiap jam menjadi lebih konstan dari pada tanpa baterai. Biaya total pembangkitan menjadi lebih murah 0,6% saat ada baterai di sistem pada kondisi normal.

Pada saat mempertimbangkan kondisi kontingensi pembangkitan pada kondisi normal harus menyesuaikan agar bila terjadi kontingensi *dispatch* ulang yang harus dilakukan dapat memenuhi batasan-batasan operasi seperti *ramp rate* dan kapasitas saluran. Hasil simulasi pada subbab 4.5.3 menunjukkan bahwa hasil simulasi adalah *feasible* atau batasan-batasan yang diberikan telah terpenuhi. SOC kedua baterai juga telah terpenuhi. Adanya baterai pada sistem, menyebabkan pembangkitan generator menjadi lebih konstan pada kondisi normal dan kontingensi seperti ditunjukkan pada gambar 4.34 dan 4.35. Biaya total pembangkitan saat normal mempertimbangkan kontingensi lebih mahal 0,1% karena baterai disiapkan untuk membantu sistem saat terjadi kontingensi.

Pada simulasi menggunakan pertimbangan batas keamanan dan kestabilan tegangan, beban pada kondisi 3 dinaikkan sebesar load margin 0,2 untuk setiap jam. Saat sistem tidak dipasang baterai, hasil simulasi menunjukkan *no feasible* atau ada batasan yang tidak terpenuhi. Dengan pemasangan baterai, hasil simulasi menunjukkan bahwa semua batasan pada sistem dapat terpenuhi atau *feasible*. Dapat kita simpulkan bahwa pemasangan baterai dapat membantu operasi sistem sehingga sistem yang awalnya tidak memenuhi batasan saat mempertimbangkan kestabilan tegangan menjadi terpenuhi. Simulasi juga menunjukkan bahwa batasan SOC kedua baterai dapat terpenuhi.

Tabel 4.36 Perbandingan biaya

Kondisi	Biaya (\$)
Normal	108500
Normal-Batas Keamanan	113653.5
Normal-Batas Keamanan-Kestabilan Tegangan	115901.1

Pada tabel 4.36 dapat dilihat perbandingan biaya pada kondisi normal, normal mempertimbangkan batas keamanan, dan normal mempertimbangkan batas keamanan dan kestabilan tegangan pada system IEEE 14 bus dengan penyimpan energi. Semakin banyak pertimbangan yang diberikan pada sistem, semakin mahal biaya operasi sistem karena akan semakin ketat batasan-batasan yang diberikan pada sistem. Dari tabel 4.36 dapat disimpulkan bahwa dengan pertimbangan batas keamanan dan kestabilan tegangan pada sistem dengan penyimpan energi, biaya pembangkitan menjadi lebih mahal 6,8%.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil simulasi dan analisis diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Baterai dapat menggantikan generator sehingga daya keluaran generator menjadi lebih konstan atau tidak fluktuatif.
2. Dengan pemasangan baterai, pada kondisi normal biaya pembangkitan dapat berkurang sampai 0,6%.
3. Pada kondisi normal mempertimbangkan kontingensi, biaya pembangkitan sistem dengan baterai lebih mahal 0,1% karena baterai disiapkan untuk membantu sistem saat terjadi kontingensi.
4. Batasan yang tidak terpenuhi saat kondisi load margin 0,2 dapat terpenuhi dengan adanya baterai pada sistem.
5. Semakin banyak pertimbangan yang diberikan pada sistem, semakin mahal biaya operasi sistem.
6. Dengan pertimbangan batas keamanan dan kestabilan tegangan pada sistem dengan penyimpan energi, biaya pembangkitan menjadi lebih mahal 6,8%.

5.2 Saran

Adapun saran untuk penelitian selanjutnya pada bidang operasi sistem tenaga berdasarkan hasil simulasi dan analisis pada penelitian ini, yaitu:

1. Mengembangkan program AC-DOPF menjadi *unit commitment* sehingga semakin mendekati keadaan *real* sistem.
2. Menggunakan *size* dan peletakan baterai yang optimal pada sistem yang akan di analisis.
3. Menambahkan efisiensi dan pengaruh umur baterai yang digunakan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. S. Wibowo, T. P. Fathurroddi, O. Penangsang and A. Soeprijanto, "Security constrained optimal power flow with FACTS devices using bender decomposition," TENCON 2014 - 2014 IEEE Region 10 Conference, Bangkok, 2014, pp. 1-5.
- [2] Y. B. N. Wigaswara, "Aliran Daya Optimal dengan Batas Keamanan Sistem Mempertimbangkan Energy Storage," Bachelor Degree, Electrical Engineering, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2017.
- [3] A. Taradini, "Dynamic Optimal Power Flow Arus Searah Mempertimbangkan Cadangan Berputar Dan Pelepasan Beban Menggunakan Quadratic Programming", Bachelor Degree, Electrical Engineering, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2015.
- [4] R. S. Wibowo, T. P. Fathurroddi, O. Penangsang and A. Soeprijanto, "Security constrained optimal power flow incorporating preventive and corrective control," 2014 Electrical Power, Electronics, Communications, Control and Informatics Seminar (EECCIS), Malang, 2014, pp. 29-34.
- [5] Prabha Kundur, "Power System Stability and Control". New York, USA: McGraw-Hill, 1994.
- [6] M. Sulaiman, "Aliran Daya Optimal Mempertimbangkan Kestabilan Tegangan dan Penggunaan Static Var Compensator (SVC) Menggunakan Metode Sequential Quadratic Programming", Bachelor Degree, Electrical Engineering, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2015.
- [7] H. Glavitsch & R. Bacher, "Optimal Power Flow Algorithms", Control and Dynamic Systems, Academic Press, pp. 135-205, 1991.
- [8] Hingorani, N. G. & Gyugyi, L. "Understanding FACTS Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems". IEEE. ISBN 0-7803-3455-8.
- [9] R. P. Devon Manz, "Look Before You Leap: The Role of Energy Storage in the Grid," IEEE Power and Energy Magazine, vol. 10, no. 4, pp. 75-84, 2012
- [10] Y. Zhang, "Day-Ahead Smart Grid Cooperative Distributed Energy Scheduling With Renewable and Storage Integration,"

IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 7, no. 4, pp. 1739 - 1748, 2016.

- [11] Y. Wen, C. Guo, D. S. Kirschen, S. Dong, “Enhanced Security-Constrained OPF With Distributed Battery Energy Storage”, *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. 98-108, 2015.

LAMPIRAN

1. Data saluran IEEE 14 bus modifikasi

Saluran	From Bus	To Bus	r	x	Kapasitas (MW)
1	1	2	0.01938	0.05917	250
2	1	5	0.05403	0.22304	250
3	2	3	0.04699	0.19797	200
4	2	4	0.5811	0.17632	200
5	2	5	0.05695	0.17388	150
6	3	4	0.06701	0.17103	150
7	4	5	0.01335	0.04211	250
8	4	7	0	0.20912	250
9	4	9	0	0.55618	200
10	5	6	0	0.25202	200
11	6	11	0.09498	0.1989	150
12	6	12	0.12291	0.25581	150
13	6	13	0.06615	0.13027	250
14	7	8	0	0.17615	250
15	7	9	0	0.11001	200
16	9	10	0.3181	0.0845	200
17	9	14	0.12711	0.27038	150
18	10	11	0.08205	0.19207	150
19	12	13	0.22092	0.19988	250
20	13	14	0.17093	0.34802	250

2. Daya keluaran pembangkit tanpa penyimpan energi untuk sistem IEEE 14 bus kondisi normal

Jam	P1	P2	P3	P4	P5
1	199.63	37.81	56.2	14.63	35.68
2	199.48	37.78	55.3	13.98	34.81
3	199.33	37.75	54.4	13.32	33.93
4	199.18	37.72	53.5	12.67	33.05
5	199.03	37.69	52.61	12.01	32.17
6	198.58	37.59	49.91	10.04	29.55
7	198.72	37.62	50.81	10.71	30.41
8	199.18	37.72	53.5	12.67	33.05
9	199.78	37.84	57.1	15.28	36.56
10	200.4	37.97	60.73	17.93	40

3. Daya keluaran pembangkit dengan penyimpan energi untuk sistem IEEE 14 bus kondisi normal

Jam	P1	P2	P3	P4	P5
1	199.23	37.68	55.38	13.09	32.76
2	198.99	37.68	54.08	13.66	31.64
3	199.57	37.77	53.88	12.87	33.62
4	199.14	37.7	53.5	12.83	33.56
5	199.02	37.67	52.74	12.16	32.92
6	198.81	37.64	51.01	11.12	32.95
7	199.38	37.75	52.01	10.01	33.66
8	199.23	37.77	53.88	11.47	33.52
9	199.54	37.82	55.94	13.45	33.26
10	199.75	37.85	59.36	15.21	35.27

4. Perbandingan KHA saluran pada system dengan baterai dan tanpa baterai pada kondisi normal

Saluran	From Bus	To Bus	KHA tanpa Baterai	KHA dengan Baterai
1	1	2	135.84	135.50
2	1	5	65.63	65.24
3	2	3	55.49	55.92
4	2	4	48.69	48.33
5	2	5	36.37	35.94
6	3	4	12.17	12.87
7	4	5	52.79	53.10
8	4	7	10.50	10.54
9	4	9	14.04	13.05
10	5	6	36.88	35.73
11	6	11	7.75	7.35
12	6	12	10.61	9.99
13	6	13	24.21	21.67
14	7	8	44.27	39.94
15	7	9	53.13	48.46
16	9	10	12.13	12.49
17	9	14	15.80	15.56
18	10	11	2.38	1.98
19	12	13	1.99	1.49
20	13	14	5.90	6.13

5. Daya keluaran pembangkit tanpa penyimpan energi untuk sistem IEEE 14 bus kondisi normal mempertimbangkan batas keamanan

Jam	P1	P2	P3	P4	P5
1	199.64	37.81	56.2	14.64	35.67
2	182.93	44.75	61.4	20.62	30.82
3	167.25	49.76	65.99	25.11	28.82
4	152.7	55.2	69.73	27.69	28.18
5	139.61	61.07	72.55	28.92	28.09
6	127.67	64.08	73.79	28.78	27.47
7	120.61	70.63	75.71	29.36	27.88
8	118	77.77	77.72	30.09	28.51
9	118.45	84.61	79.63	30.87	29.23
10	120.69	90.08	81.16	31.64	29.97

6. Daya keluaran pembangkit dengan penyimpan energi untuk sistem IEEE 14 bus kondisi normal mempertimbangkan batas keamanan

Jam	P1	P2	P3	P4	P5
1	198.96	37.69	54.45	11.09	30.6
2	184.15	49.48	61.29	18.61	31.51
3	169.14	52.34	65.98	23.93	29.15
4	154.31	56.74	69.38	27.19	28.17
5	140.39	62.39	71.96	28.72	27.94
6	127.77	65.87	73.3	28.76	27.43
7	119.71	72.46	75.14	29.38	27.88
8	116.48	79.44	77.18	30.11	28.54
9	116.65	85.83	79.06	30.84	29.23
10	118.37	90.8	80.51	31.52	29.89

7. Perbandingan KHA saluran pada system dengan baterai dan tanpa baterai pada kondisi normal

Saluran	From Bus	To Bus	KHA tanpa Baterai	KHA dengan Baterai
1	1	2	71.37	69.74
2	1	5	49.51	48.67
3	2	3	45.23	45.29
4	2	4	48.51	47.96
5	2	5	37.78	37.28
6	3	4	2.77	2.86
7	4	5	46.06	45.85
8	4	7	14.51	13.67
9	4	9	14.78	14.29
10	5	6	29.49	28.43
11	6	11	10.92	10.86
12	6	12	11.01	10.79
13	6	13	25.86	24.96
14	7	8	33.51	33.31
15	7	9	47.41	46.45
16	9	10	10.00	10.04
17	9	14	13.96	13.81
18	10	11	5.70	5.64
19	12	13	2.34	2.14
20	13	14	7.97	8.13

8. Daya keluaran pembangkit dengan penyimpanan energi untuk sistem IEEE 14 bus kondisi normal mempertimbangkan batas keamanan dan kestabilan tegangan

Jam	P1	P2	P3	P4	P5
1	196.49	37.4	57.53	11.12	30
2	181.24	49.98	65.18	19.61	29.21
3	165.41	53.81	70.78	25.38	26.55
4	150	60.15	74.51	26.77	25.74
5	135.8	67.72	76.68	26.94	25.61
6	122.93	72.61	76.98	26.44	25.1
7	114.95	80.54	78.38	26.79	25.5
8	111.93	88.63	80.24	27.39	26.12
9	111.87	96.09	82.32	28.18	26.9
10	113.29	101.93	84.25	29.11	27.82

BIODATA PENULIS



Qori' Dwi Intansari lahir di Pamekasan tanggal 16 Juli 1996. Merupakan anak ke-2 dari 3 bersaudara pasangan Suparto dan Sri Astutik. Penulis menempuh Pendidikan dasar di SDN Barurambat Kota 2 Pamekasan pada tahun 2002-2008. Penulis kemudian melanjutkan sekolah di SMPN 2 Pamekasan pada 2008-2011 dan melanjutkan Pendidikan menengah atas di SMAN 3 Pamekasan pada 2011-2014. Pada tahun 2014 penulis melanjutkan studi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya Departemen Teknik Elektro bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Penulis dapat dihubungi melalui email: qoridwiintansari37@gmail.com.

Halaman ini sengaja dikosongkan